

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Hornicko-geologická fakulta  
Institut geoinformatiky

## Disertační práce doktorského studia

Způsoby reprezentace prostorových dat pro simulace  
založené na multi-agentovém systému

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

**HORNICKO-GEOLOGICKÁ FAKULTA**



**Studijní obor GEOINFORMATIKA**

**Disertační práce doktorského studia**

**Způsoby reprezentace prostorových dat  
pro simulace založené na multi-agentovém  
systému**

**Ostrava, 2008**

**Zpracoval:  
Školitel:**

**Ing. Petr Fuks  
doc. Ing. Petr Rapant, CSc.**

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci zpracoval samostatně a že jsem vyznačil  
prameny, z nichž jsem pro svou práci čerpal způsobem ve vědecké práci obvyklým.

V Ostravě .....

Ing. Petr Fuks .....

# Abstrakt

Fuks, P. *Způsoby reprezentace prostorových dat pro simulace založené na multi-agentovém systému*. Ostrava, HGF, Institut geoinformatiky (548). Disertační práce doktorského studia. Školitel: doc. Ing. Petr Rapant, CSc.

Práce se zabývá způsoby reprezentace prostředí pro multi-agentové systémy (MAS) v oblasti prostorového modelování a simulace, návrhem prostorového modelu prostředí MAS a integrací funkcí GIS do MAS za účelem využití a zpracování prostorových dat pro tvorbu prostorových modelů reálných systémů.

V úvodu práce jsou popsány dva nejvýznamnější přístupy používané v tzv. mikrosimulacích - celulární automaty (CA) a MAS. Úvodní část vysvětluje princip uvedených přístupů a jejich možné způsoby popisu prostředí. Kromě teoretického rozboru jsou zde uvedeny i konkrétní aplikace obou přístupů. Dále je provedeno srovnání obou modelů a uvedena omezení plynoucí z jejich využití. Práce rovněž obsahuje odkazy na nejvýznamnější vývojové platformy určené pro vývoj modelů založených na agentovém přístupu. Dále je popsán význam propojení MAS a GIS pro vývoj modelů reálných prostorových systémů a způsoby využití datových modelů GIS pro reprezentaci prostředí.

Po úvodní teoretické části se práce zaměřuje na vývoj prostorového MAS pro dopravní simulaci, na jehož základě byly stanoveny cíle práce. Je zde představena případová studie zabývající se vývojem simulačního prostředí, určeného pro testování možností nasazení inteligentních agentů pro simulaci individuálního chování vozidel v rámci silniční infrastruktury, generované na základě dat skutečné silniční sítě.

Dále práce obsahuje analýzu standardu pro ukládání geodat o dopravní infrastrukturu (GDF), na jejímž základě byl proveden návrh objektově orientovaného modelu dopravní infrastruktury, který tvoří simulační prostředí MAS, s ohledem na možnosti dnešních dat. Kromě navržené struktury modelu jsou zde uvedeny možné způsoby reprezentace prostoru silničních úseků a křižovatek a porovnány jejich vlastnosti pro následnou implementaci modelu. Dále jsou popsány způsoby prostorového vnímání agentů a způsob integrace prostředí silniční infrastruktury do simulačního MAS.

Na návrh prostorového MAS navazuje část věnující se výběru dat a jejich popisu. Po představení datového modelu vstupních dat je popsána implementace konverzního modulu, umožňujícího využití zvolené datové sady silniční databanky Ostrava, pro vygenerování prostředí silniční infrastruktury. Rovněž je zde popsán způsob implementace prostorového vnímání agentů simulujících dopravní prostředky a rozšíření vizualizačních možností simulátoru.

V závěru práce jsou uvedeny možné praktické aplikace vytvořeného simulačního prostředí, navrženy možnosti jeho dalšího rozšíření a zhodnoceny přínosy práce.

Klíčová slova: Multi-agentový systém, GIS, Dopravní simulace, GDF, Java, JADE.

# Abstract

Fuks, P. *Representation ways of spatial data for agent based modelling*. Ostrava, HGF, Institute of geoinformatics (548). PhD. dissertation. Supervisor: doc. Ing. Petr Rapant, CSc.

The work deals with the ways of environment representation for multi-agent systems (MAS) in the field of spatial modelling and simulation, design of spatial MAS and the integration of the functions of GIS in MAS for the purpose of application and processing spatial data for creating spatial models of real systems.

In the introduction, the work describes two major approaches used in the so-called microsimulation - cellular automata (CA) and MAS. Introductory section explains the principle of the approaches and their possible ways of describing the environment. Besides to the theoretical analysis specific applications of both accesses are listed. Further the comparison of both models is done and restrictions resulting from their use are stated. The work also includes links to the most important development platforms determined for the development of agent based models. It is also described the importance of linking MAS and GIS for the development of real spatial systems models and ways of using GIS data models for the environment representation.

After the initial theoretical part, the work focuses on the development of spatial MAS for transport simulation, on which objectives were established . It is presented case study dealing with the development of simulation environment for testing the possibilities of the use of intelligent agents to simulate the individual vehicles behaviour in the road infrastructure on the basis of data generated by the real road network.

Next, the work includes an analysis of a geodata standard for the storage of transport infrastructure (GDF) on which basis object-oriented model of transport infrastructure was made, with regard to the today's data possibility forming the MAS environment. In addition, to the proposed the model structure, possible ways of representation of the area of road sections and junctions are listed and their properties for the subsequent the model implementation are compared. The methods of spatial perception agents and the integration of the road infrastructure into the simulation MAS are also described.

The next chapter is dedicated to the data selection and their description. After the presentation of data model of input data, there is a description of the conversion module implementation allowing the use of selected a dataset, road databank of Ostrava, to generate the road infrastructure. It also describes the implementation of agents spatial perception simulating the transport participants and expansion of visualization options simulator.

At the end of the work possible practical applications of the generated simulation

environment are given and is suggested the possibility of its further expansion and the benefits of work are evaluated.

Keywords: Multi-agent system, GIS, Java, JADE, Traffic Simulation, GDF

# Obsah

<b>1</b>	<b>Motivace</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Modelování a simulace s využitím celulárních automatů a multi-agentových systémů</b>	<b>13</b>
2.1	Modelování a simulace . . . . .	13
2.2	Modelování založené na celulárních automatech . . . . .	14
2.2.1	Definice celulárního automatu . . . . .	14
2.2.2	Simulace dopravy s využitím celulárních automatů . . . . .	16
2.3	Modelování založené na multi-agentovém systému . . . . .	18
2.3.1	Definice pojmu Agent a multi-agentové systémy . . . . .	19
2.3.2	Definice modelování s využitím agentového přístupu . . . . .	20
2.4	Reprezentace prostředí v CA a ABM . . . . .	21
2.4.1	Využití rastrových dat pro ABM . . . . .	21
2.4.2	Využití vektorových dat pro ABM . . . . .	22
2.4.3	Využití hybridního modelu pro ABM . . . . .	23
2.4.4	Omezení reprezentace prostoru a času v dynamických prostorových modelech . . . . .	24
2.5	Existující řešení v oblasti ABM . . . . .	24
2.6	Příklady prostorového modelování . . . . .	26
2.6.1	Modelování s využitím rastrového modelu . . . . .	26
2.6.2	Modelování s využitím vektorového modelu . . . . .	27
2.6.3	Modelování nad hybridním modelem . . . . .	27
2.6.4	Zhodnocení . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Nedostatky dnešních platforem pro ABM</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>Cíle práce</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>Metody a prostředky realizace</b>	<b>33</b>
5.1	Standardy . . . . .	33
5.2	Navigační a silniční data . . . . .	33
5.3	Topologické funkce GIS knihoven . . . . .	34
5.4	Platforma pro vývoj MAS . . . . .	34
5.5	GIS nástroje pro import dat a vizualizaci . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Realizace a výsledky</b>	<b>35</b>
6.1	Specifikace případové studie . . . . .	35
6.2	Analýza standardu pro ukládání silničních dat . . . . .	38
6.3	Návrh modelu silniční infrastruktury . . . . .	41
6.3.1	Úrovně popisu modelu silniční sítě a jejich význam . . . . .	43

6.3.2	Způsoby adresace poloh agentů a možnosti jejich pohybu . . .	45
6.3.3	Zapojení modelu prostředí do MAS . . . . .	47
6.4	Způsob reprezentace prostředí v modelu silniční infrastruktury . . . .	49
6.4.1	Diskrétní reprezentace prostoru silniční sítě . . . . .	49
6.4.2	Kontinuální reprezentace prostoru v rámci silničních úseků . .	55
6.4.3	Řešení prostorových vztahů v rámci plošného prostoru křižovatky	58
6.5	Výběr a popis použitých silničních dat . . . . .	60
6.5.1	Data porubského areálu VŠB-TU Ostrava . . . . .	61
6.5.2	Data silniční databanky Ostrava . . . . .	62
6.6	Implementace . . . . .	65
6.6.1	Implementace objektového modelu sítě do architektury simu- látoru . . . . .	65
6.6.2	Implementace konverzního modulu pro načtení silničních dat .	67
6.6.3	Implementace vnímání prostředí CarAgenty . . . . .	70
6.6.4	Implementace nových vizualizačních možností simulátoru . . .	73
<b>7</b>	<b>Aplikace simulačního prostředí dopravního systému</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>78</b>



## Seznam obrázků

1	Reprezentace okolí v CA a) Neumanovo b) Moorovo. . . . .	15
2	Příklad jednoduchého celulárního automatu šíření ohně . . . . .	16
3	Simulace pohybu na základě Nagel/Schreckenbergova modelu . . . . .	18
4	Definice celulárních automatů pomocí polygonů. . . . .	28
5	Porovnání výsledků modelování pomocí vektorových a klasických CA se skutečným vývojem. . . . .	29
6	Členění popisu dat podle normy GDF. . . . .	38
7	Ukázka reprezentace silniční sítě na úrovni 0. . . . .	39
8	Ukázka reprezentace silniční sítě na úrovni 1. . . . .	40
9	Ukázka reprezentace silniční sítě na úrovni 2. . . . .	41
10	Způsob indexování dopravních pruhů v rámci silničního úseku. Infor- mace o počtu a směrech jízdních pruhů vychází z atributů RoadElementu	42
11	Příslušnost nadefinovaných entit modelu k jednotlivým úrovním po- pisu silniční sítě. . . . .	43
12	Ukázka napojení jízdních pruhů mezi dopravními úseky (RoadElement)	44
13	Schématický pohled na jednotlivé úrovně popisu silniční sítě navrže- ného modelu. . . . .	46
14	Příklad určení polohy agenta simulujícího dopravní prostředek. . . . .	47
15	Reprezentace prostředí pro CarAgenty pomocí InfrastructureAgentu s popisem průběhu simulace . . . . .	48
16	Příklad šíření polí CarAgenty v rámci části silničního úseku reprezen- tovaného celulárním automatem. . . . .	50
17	Vyznačená plocha buněk překrytí mezi dvěma silničními úseky. . . . .	51
18	Vyznačená plocha buněk překrytí mezi křižovatkou a napojenými sil- ničními úseky. . . . .	51
19	Síť buněk typové křižovatky včetně trajektorií průjezdu . . . . .	53
20	Trajektorie vozidla při předjíždění 1) v reálné silniční síti 2) v modelu silniční sítě . . . . .	56
21	Souřadnicový systém v rámci entity RoadElement . . . . .	57
22	Měření vzdáleností v navrženém prostoru modelu . . . . .	57
23	Schéma křižovatky - prostoru, kde se protínají středové linie jízdních pruhů. . . . .	59
24	Způsob vytvoření liniového prvku středových os jízdních pruhů z ge- ometrie středové line silničního úseku. . . . .	59
25	Geometrický popis silniční sítě z dat SDO. . . . .	63
26	Diagram tříd modelu silniční infrastruktury . . . . .	66
27	Architektura silničního simulátoru postaveného na MAS . . . . .	67

28	Diagram činností při vzniku InfrastructureAgenta tvořícího prostředí silniční infrastruktury na základě silničních dat. . . . .	68
29	Diagram tříd pro import dat z GIS . . . . .	69
30	Ukázka úprav dat Silniční databanky Ostrava . . . . .	70
31	Proces konverze dat SDO . . . . .	71
32	Vnitřní dělení CarAgentu s naznačenou komunikací vnitřních jednotek	72
33	3D vizualizace průběhu simulace v aplikaci ESRI ArcScene. . . . .	74

## Seznam tabulek

1	Stavy buněk celulárního automatu zobrazeného na obrázku č. 2. . . .	16
2	Atributová tabulka vrstvy nemovitostí. . . . .	23
3	Seznam atributů entity Lane . . . . .	43
4	Ukázka propojení silničních pruhů dvou silničních úseků RE21 a RE22 v entitě Junction . . . . .	44
5	Seznam atributů entity Junction . . . . .	44
6	Seznam atributů entity RoadElement . . . . .	45
7	Seznam atributů entity Intersection . . . . .	45
8	Seznam atributů entity Road . . . . .	45
9	Možný zápis bodů křížení. Jeden řádek reprezentuje zápis pro jednu entitu Lane. . . . .	60
10	Seznam tříd geoprvků . . . . .	87
11	Vztahy mezi třídami geoprvků . . . . .	88
12	Třída geoprvků - Body křížení . . . . .	89
13	Číselník atributů <i>jtype</i> pro třídu geoprvků vsb_junction . . . . .	89
14	Třída geoprvků - Osy komunikací . . . . .	90
15	Třída geoprvků - Dopravní značení . . . . .	91
16	Číselník atributů <i>sign_type</i> pro třídu geoprvků traffic_signs . . . . .	91

## Seznam zkratek

ACL	Agent Communication Language
API	Application programming interface
ABM	Agent based modelling
CA	cellular automaton
CEDA	Central European Data Agency
GDF	Geographic Data File
DMR	Digitální model reliéfu
FIPA	The Foundation of Intelligent Physical Agents
JADE	Java Agent DEvelopment framework
JTS	Java Topology Suite
ISO	International Organization for Standardization
MAS	Multi Agent System
OGC	Open Geospatial Consortium
SDO	Silniční databanka Ostrava
SQL	Structured Query Language
XML	Extensible Markup Language

# 1 Motivace

Multi-agentové systémy jsou nové paradigma uplatňující se v širé škále oborů od softwarového inženýrství až po komplexní modelování a simulace. V posledních několika letech jsou společně s již poměrně tradičními celulárními automaty stále více využívány také pro dynamické prostorové modelování. Důvodem je jejich nový přístup a způsob implementace výpočetních modelů. Klasický způsob popisu reálného systému jako celku, pomocí matematických rovnic, je velice náročný z důvodu vysoké složitosti vztahů mezi jednotlivými částmi systému, které se vzájemně ovlivňují. Využitím multi-agentového přístupu lze modelovat systém na základě interakcí jeho částí bez nutnosti popisu systému jako celku. Definice pravidel mezi jednotlivými částmi systému se v mnohých případech ukázala být snazší a také přesnější než popis pomocí univerzálních pravidel platných pro celý systém. Tento způsob modelování, kdy se chování systému modeluje pomocí interakcí jeho částí není nový, již byl v praxi ověřen. Jednou z prvních metod umožňujících přistupovat tímto způsobem k popisu chování celého systému jsou celulární automaty. Toto paradigma inspirované biologií a evoluční teorií vychází z napodobení principů, které stojí za vznikem živých organismů. Spojování několika málo druhů buněk s jednoduchým chováním lze vytvořit velice složité organismy. Tento princip byl rozpracován do podoby počítačových modelů, které jsou složeny z buněk charakterizovaných svým stavem. Stav buněk se mění v čase v závislosti na globálních pravidlech aplikovaných na všechny buňky s ohledem na stav buněk v jejich okolí. Tento mechanismus, který se velice snadno implementuje a je poměrně málo výpočetně náročný se ukázal být velice silným nástrojem pro modelování i poměrně komplikovaných systémů. V oblasti prostorového modelování je to například modelování šíření požáru, vody, plynu nebo růst urbanistických celků měst v čase. V průběhu času se však ukázaly nedostatky celulárních automatů při modelování systémů složených z individuálních entit, jako jsou například lidé. Tyto nedostatky pramení z aplikací globálních pravidel, což potlačuje individualitu jednotlivých částí systému. Multi-agentové systémy se díky své koncepci, která je založena na interakci autonomních jednotek zvaných agenty, které mohou být vybaveny i umělou inteligencí, staly přirozeným rozšířením paradigmatu celulárních automatů. Multi-agentové systémy tak umožňují modelovat i systémy složené z autonomních nebo dokonce i inteligentních jedinců. V případě prostorových systémů je však kromě popisu jednotlivých částí systémů také potřeba vhodným způsobem reprezentovat prostor, v němž se modelovaný systém nachází. Celulární automaty mají omezenou reprezentaci prostoru statickou strukturou sítě buněk.

Naproti tomu paradigma multi-agentového systému nemá definován žádný konkrétní způsob popisu prostředí, v kterém agenty existují. Díky tomuto jsou abstraktnější než celulární automaty a konkrétní reprezentace prostředí závisí na účelu

a požadované přesnosti modelovaného systému. Z historických důvodů je pro definici prostoru velice často zvolena síť buněk do nichž jsou agenty umístěny a v rámci nichž se mohou pohybovat, tedy stejný způsob reprezentace prostoru jaký je využíván v celulárních automatech. Tento přístup však do jisté míry omezuje možnosti vytvářené modelu a proto je v poslední době upřednostňována kontinuální reprezentace dvojrozměrného i trojrozměrného prostoru, která přináší přesnější adresaci polohy a realističtější pohyb agentů. Dále dovoluje definovat tvarově rozmanité agenty na základě vektorového datového modelu.

Aby však bylo možné modelovat reálné prostorové systémy v prostředí počítače, ať už pomocí sítě buněk nebo geometrickou reprezentací jednotlivých agentů, je nejprve potřeba převést prostředí modelovaného systému do digitální podoby. K tomuto účelu jsou primárně využívány geografické informační systémy (GIS). GIS slouží od porřízení dat, přes jejich zpracování až po jejich vizualizaci. Využívání celulárních automatů a multi-agentových systémů společně s GIS je v poslední době intenzivně řešeno mnoha odborníky z celého světa. Spojení MAS s GIS a také popis prostoru pro MAS je však stále poměrně málo rozpracováno. Tato práce je zaměřena na průzkum existujících řešení reprezentace prostředí pro agenty a také na návrh konkrétního řešení zaměřeného na modelování individuální dopravy. Výsledkem této práce je navržení vhodné reprezentace silniční sítě vycházející z dat silniční infrastruktury, sloužící k definici prostředí multi-agentového systému, využívající prostředků logiky a umělé inteligence k simulaci pohybu individuálních vozidel.

## 2 Modelování a simulace s využitím celulárních automatů a multi-agentových systémů

V oblasti modelování a simulace se stále častěji využívá přístupu, který modeluje zkoumaný systém tzv. “zdola nahoru“. V tomto přístupu se techniky pro modelování a simulaci zaměřují na popis základních částí systému. Simulace jejich dílčího chování ve vzájemné interakci mezi těmito částmi a prostředím ve kterém se nacházejí, pak ve výsledku simuluje chování celého systému. Nejpoužívanějšími přístupy v těchto tzv. mikrosimulacích jsou celulární automaty, zkráceně CA a multi-agentové systémy, zkráceně MAS. Jejich využití dnes nejčastěji najdeme v těchto aplikacích modelování a simulace:

- simulace vývoje urbanistických celků
- simulace změn zemského pokryvu
- simulace šíření plynu, ohně, vody
- simulace chování davu lidí (využití pro krizové řízení)
- dopravní simulace

Tato kapitola se věnuje popsání těchto dvou technik a způsobu jejich využití pro prostorové modelování a simulace.

### 2.1 Modelování a simulace

Podobně jako je tomu u většiny vědeckých pojmů, nejsou pojmy z oblasti modelování a simulace vždy jednotně definovány. Nalezení standardní definice pro různé oblasti jejich použití není možné. Pro dobré pochopení významu těchto pojmů je zde uveden jejich zamýšlený význam v kontextu této práce. Pro vysvětlení jejich původního významu je zde nejprve uveden jejich popis z výkladového slovníku [43]:

- **Modelování** (z anglického modelling) - plánování nebo formování podle vzoru (“to plan or form after a pattern”).
- **Model** (z latiny modulus - malý rozsah (míra) z anglického model) :
  1. zastarale - množina plánů pro stavbu budovy (“obsolete : a set of plans for a building”).
  2. obvykle miniaturní zastoupení něčeho, nebo také předloha pro něco, co bude vytvořeno (“A usually miniature representation of something; also : a pattern of something to be made”).

- **Simulace** (z anglického simulation) - napodobující fungování jednoho systému nebo procesu pomocí fungování jiného ("The imitative representation of the functioning of one system or process by means of the functioning of another").
- **Simulátor** (z anglického simulator) - někdo kdo simuluje; zvláště pak: zařízení, které umožňuje obsluhu (odborníkovi) za daných podmínek reprodukovat nebo reprezentovat jevy podobně, jako je tomu při jejich skutečném průběhu ("one that simulates; especially : a device that enables the operator to reproduce or represent under test conditions phenomena likely to occur in actual performance").

Zmíněné pojmy jsou pro oblast simulace a modelování více méně podobně definovány. Vybrány byly definice, které ve vzájemném kontextu vysvětlují pojmy používané v textu práce:

**Modelování** - je proces vytváření zjednodušeného obrazu reálného systému - modelu [25].

**Model** - je fyzická, matematická, nebo logická reprezentace systému, jevu nebo procesu [44].

**Simulace** - simulace je implementací modelu v čase [44].

**Simulátor** - je zařízení, počítačový program nebo systém použitý v průběhu verifikace, který se chová jako zkoumaný systém na základě množiny řízených vstupů [46].

V textu předložené dizertační práce je tedy modelování chápáno jako proces vytváření modelu systému (konkrétně dopravního systému), který zjednodušenou formou popisuje reálný systém. Simulace je pak realizací tohoto modelu v čase, za účelem ověření určitého chování zkoumaného systému. A konečně simulátor, je počítačový program umožňující realizovat simulaci zvoleného systému.

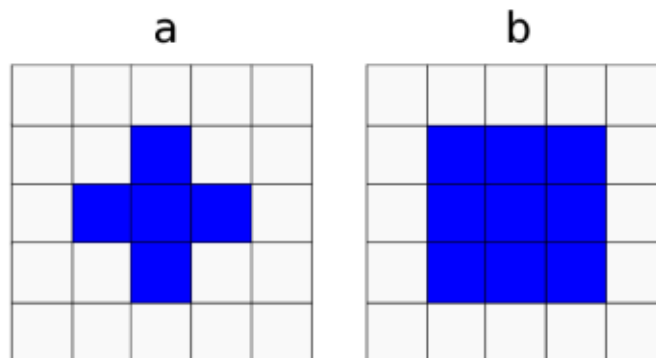
## 2.2 Modelování založené na celulárních automatech

### 2.2.1 Definice celulárního automatu

Celulární automat (CA) je dynamický systém, ve kterém je čas i prostor diskrétní. Skládá se z pravidelné mřížky buněk, kde každá buňka může být v jednom z konečného počtu možných stavů  $k$ . Aktualizace sítě probíhá souběžně v diskrétních časových krocích, podle lokálních, identických, iteračních (tzv. tranzitivních) pravidel na základě hodnot buněk okolí [40]. Definice okolí do značné míry ovlivňuje výsledek simulace. Mezi nejznámější typy okolí patří Neumanovo a Moorovo (viz obrázek 1).

Za autora myšlenky celulárních automatů je považován matematik Jon von Neumann, který v roce 1957 vytvořil dvourozměrný, dvacetisedmi stavový celulární automat, při vývoji samoreprodukčního systému. Myšlenka celulárního automatu se ale





Obrázek 1: Reprezentace okolí v CA a) Neumanovo b) Moorovo.

do popředí zájmu dostala díky Johnu Hortonovi Conwayovi z univerzity v Cambridge a jeho celulárnímu automatu s názvem Hra života (Game of life, viz [52]). Tento celulární automat nebyl zdaleka tak komplexní jako ten, který vytvořil von Neumann, ale díky své jednoduchosti ukázal přednosti tohoto modelu. Hra života demonstrovala, jak na základě jednoduchých pravidel a počátečních podmínek mohou vznikat složité systémy, podobně jako je tomu v evoluci [41].

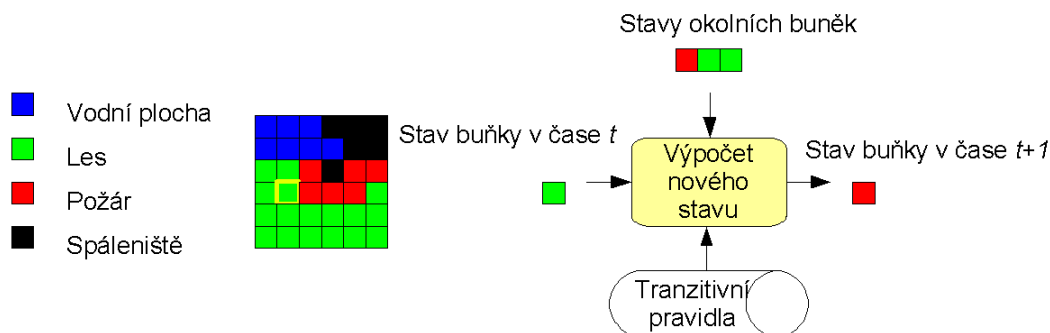
Kromě původního využití celulárních automatů v oblasti biologie jako nástroje pro napodobování sebe reprodukce živých buněk je dnes využíván, v celé řadě vědních oborů, pro modelování a simulaci. Pro objasnění funkce celulárních automatů je na obrázku č. 2 zobrazen jednoduchý celulární automat šíření požáru v lesním porostu. Barvy (stavy) buněk představují čtyři druhy zemského povrchu podle tabulky 1. Pro každý časový krok se pro každou buňku vypočítá její nový stav. Nový stav je vypočítán na základě iteračních pravidel ze stavů buněk v okolí aktuální buňky (předpokládáme Moorovo okolí) a stavu samotné buňky. V případě uvedeného celulárního automatu jsou pravidla následující:

1. Pokud je aktuální buňka les a v jejím okolí se nalézá alespoň jedna buňka ve stavu hořící, změní se stav aktuální buňky na hořící.
2. Pokud je aktuální buňka hořící po dobu pěti časových kroků, změní se stav buňky na spáleniště.
3. Pokud je buňka ve stavu voda nebo spáleniště, její stav se nemění.

Aby bylo možné sledovat, jak dlouho je buňka ve stavu hořící je potřeba, aby se kromě barvy určující její typ povrchu do buňky ukládaly i informace o počtu časových kroků, ve kterých je buňka v tomto stavu. Řešením je ukládání více hodnot

Stav (barva)	Typ povrchu
modrá	vodní plocha
zelená	lesní plocha
červená	aktuálně hořící plocha
černá	spáleniště

Tabulka 1: Stavy buněk celulárního automatu zobrazeného na obrázku č. 2.



Obrázek 2: Příklad jednoduchého celulárního automatu šíření ohně

do jedné buňky nebo vytvoření další sítě buněk o stejných rozměrech, do kterých se tato doplňková informace uloží. V praxi je většinou použito druhého způsobu, protože sítě buněk jsou uloženy v rasterovém modelu, tedy každé buňce je přiřazena pouze jedna hodnota.

Kromě simulace šíření je celulárních automatů velmi často využíváno pro simulaci vývoje urbanistických celků [6], vývoje změn zemského pokryvu [30] a simulace pohybu dopravních prostředků [22]. Vzhledem k zaměření praktické části této práce jsou dále detailněji rozebrány existující celulární automaty pro oblast simulace dopravy.

### 2.2.2 Simulace dopravy s využitím celulárních automatů

V případě dopravních modelů jsou využity jednoduché buďto jednorozměrné nebo dvojrozměrné celulární automaty, pro napodobení pohybu vozidel v prostoru jednoho nebo více jízdních pruhů stejného směru, ale také komplexní celulární automaty pro reprezentaci pohybu vozidel v celé uliční síti města [22]. Existující modely dopravy se tedy liší v závislosti na rozměru celulárního automatu a komplexnosti pravidel. Jejich složitost je různá, od modelování jednoduchých jevů, jako jsou například jízda v jednom jízdním pruhu (zkoumání tzv. šokové vlny - vznik kolony při zastavování a rozjíždění automobilů), přes chování dopravního toku v určitých částech silniční sítě, jako jsou nájezdy, kruhové objezdy, křižovatky atd, až po komplexní simulaci dopravy v rámci celého města.

Iterační pravidla, používaná pro simulaci pohybu v síti buněk, vychází z teorie sledujících se vozidel (z angl. car-following theories). Tyto teorie pohlíží na dopravní systém jako množinu částic, jejichž pohyb se řídí pohybem částic v jejich okolí (mikroskopický pohled). Chování jednotlivých vozidel je separátně popsáno rovnicí pohybu. Rozdílnost modelů vycházejících z této teorie vychází z různého sestavení těchto rovnic. Rovnice pohybu jsou sestaveny na základě parametrů rychlosti a vzdálenosti mezi sledujícím vozidlem a vedoucím vozidlem. Jedním ze základních modelů je model označovaný "Následuj vůdce" (follow the leader), který vycházel z teorie, že vozidla se snaží udržovat stejnou rychlost jako vozidlo před nimi, tedy vozidlo se snaží udržet bezpečnou vzdálenost k vozidlu před ním [22]. Tato základní myšlenka byla v průběhu vývoje rozšířena o další pravidla, jakou jsou náhodné zpomalení (vnáší vliv náhody do modelu) nebo rozšířením modelu o pohyb vozidel ve více jízdních pruzích, což umožní simulaci předjíždění vozidel.

Nejnámějším dopravním modelem, který je založen na celulárním automatu, je bezesporu Nagel/Schreckenberg model. Tento model je realizován jednorozměrným automatem, polem buněk o velikosti 7,5 m, kde buňky obsahující vozidlo mají hodnotu odpovídající jeho rychlosti a buňky, které vozidlo neobsahují, mají prázdnou hodnotu (Null). Aplikace iteračních pravidel v rámci jednoho časového kroku je rozdělena do dvou fází. V první fázi je v závislosti na vzdálenosti mezi daným vozidlem a vozidlem před ním upravena jeho rychlost. Pokud je tato vzdálenost menší než rychlost vozidla (počet buněk o které se vozidlo přemístí za jeden časový krok) je rychlost snížena na počet volných buněk mezi vozidly. Jestli je rychlost větší, zvýší se o jednu buňku za časový krok, pokud ovšem již není na maximální hodnotě rychlosti vozidla. Aby model více odpovídal skutečnosti, je s určitou pravděpodobností snížena rychlost o jedna. V druhé fázi se provede samotný pohyb vozidel, tedy nastavení příslušných buněk na vypočtené hodnoty rychlosti. Popsaná pravidla se dají implementovat pomocí následujících podmínek:

1. Zvýšení rychlost:

IF ( $v < v_{max}$ ) THEN  $v = v + 1$

2. Snížení v závislosti na mezeře mezi následujícím vozidlem:

IF ( $v > gap$ ) THEN  $v = gap$

3. Efekt náhodného zpomalení:

IF ( $v > 0$ ) AND ( $rand < p_{noise}$ ) THEN  $v = v - 1$

kde  $v$  je rychlost vozidla,  $v_{max}$  je maximální rychlost vozidla,  $gap$  je vzdálenost mezi vozidly,  $p_{noise}$  je mez náhodného zpomalení.

Aplikace pravidel na buňky pole ilustruje obrázek č. 3.

Výchozí stav



Fáze 1 - upravení rychlostí



$$v = 5 > 2 \rightarrow v = 2$$

$$V = 2 < 4 \rightarrow v = 2 + 1 = 3$$

$$v = 1 < 3 \rightarrow v = 1 + 1 - 1 = 1$$
  
 (aplikace náhodného zpomalení)

Fáze 2 - realizace pohybu



Pozn.: maximální rychlost vozidel je 5

Obrázek 3: Simulace pohybu na základě Nagel/Schreckenbergova modelu

Závěrem je nutné dodat, že simulace dopravy pomocí celulárních automatů je založena na teoriích, které zjednodušují chování automobilů na univerzální pravidla globálně aplikovaná na všechny vozidla. Tato pravidla tak neumožňují popsat individuální chování řidičů ani konstrukční odlišnosti jednotlivých vozidel. Celulární automaty tedy pracují na mikro úrovni s jednotlivými vozidly, ale již nejsou schopné zajistit simulaci jejich individuálního chování. Obecně se dá říci, že celulární automaty jsou vhodné pro simulování takových systémů, které jsou charakterizovány množinou stavů buněk rozložených v síti, pro jejichž změnu stavu existují stejná pravidla platná pro všechny buňky sítě.

## 2.3 Modelování založené na multi-agentovém systému

Předchozí kapitola popsala způsoby simulace pomocí celulárních automatů. Z jejich principu je patrné, že k simulaci systému je nutné jeho popsání pomocí sítě buněk a definicí pravidel na základě určité teorie popřípadě empirického měření. Tato pravidla jsou navržena univerzálně pro každou část systému a jsou aplikována na každou buňku (okolí buňky) stejně. V případě simulace určitých reálných systémů je však nemožné nalezení těchto univerzálních pravidel, protože jednotlivé části systému mají odlišné, autonomní chování. Takovýto systém tvořený množinou heterogenních jednotek s individuálními vlastnostmi a chováním, jež ve výsledku tvoří velice komplexní systém, je těžké popsat obecnými pravidly. Pro modelování takovýchto systémů složených z autonomních jednotek se jeví výhodné využití tzv.

multi-agentových systémů.

Modelování založené na agentovém přístupu se dá popsat jako přirozené rozšíření modelování, které pracuje na principu celulárních automatů. Celulární automaty pracují s lokálními hodnotami okolí pomocí globálních pravidel. Naproti tomu multi-agentové systémy pracují s okolními entitami na základě individuálních pravidel a specifických vlastností. Pro objasnění základních pojmů a koncepce tohoto nového paradigmatu slouží následující kapitoly.

### 2.3.1 Definice pojmu Agent a multi-agentové systémy

Pro pojem agent a multi-agentový systém neexistuje univerzální definice. Jedna z nejčastěji citovaných definic popisuje agenta jako fyzickou nebo virtuální entitu [20]:

- která je schopná jednání v prostředí,
- která může komunikovat přímo s dalšími agenty,
- která je řízena množinou úmyslů (ve formě individuálních cílů nebo funkcí za účelem uspokojovat své potřeby a potřebou přežít, které se snaží optimalizovat),
- která ovládá zdroje pro svoje potřeby,
- která je schopná vnímat svoje prostředí (v omezeném rozsahu),
- která má pouze omezenou reprezentaci tohoto prostředí (a nemusí mít žádnou),
- která má určité schopnosti a může nabízet své služby,
- která se může reprodukovat,
- její chování slouží k uspokojování svých cílů. K tomuto účelu využívá dostupných zdrojů, svých dovedností a to v závislosti na vnímání, jejich reprezentaci a přijímané komunikaci.

Termín multi-agentový systém (MAS) se používá pro systém zahrnující tyto elementy [20]:

- prostředí  $E$ , které může být prostorové,
- množinu objektů  $O$ . Tyto objekty jsou situovány, tedy v daném okamžiku je možné je spojit s určitým místem v prostředí  $E$ . Tyto objekty jsou pasivní, mohou být vnímány, vytvořeny, zničeny nebo modifikovány agenty,
- skupinu agentů  $A$ , kteří jsou speciálním případem objektů ( $A$  je podmnožinou  $O$ ), reprezentující aktivní entity systému,

- množinu vztahů  $R$ , které vzájemně propojují objekty (a tedy také agenty),
- množinu operací  $Op$  umožňující agentům vnímat, produkovat, konzumovat, transformovat a manipulovat s objekty  $O$ ,
- operátory, jejichž úkolem je popis a aplikace operací a reakcí světa, které lze také nazývat zákony univerza.

Obecný MAS nemá definované prostředí v podobě metrického prostoru odpovídající reálnému světu, ale agenty mají mezi sebou definovány pouze neprostorové vztahy. V takovémto prostředí mají agenty povědomí o ostatních agentech, popřípadě jejich umístění (například IP adresa počítače) pouze v rámci určité neprostorové struktury. Speciálním případem MAS je tzv. prostorový MAS, kde každý agent má přesně určenou polohu v prostoru a jsou zde řešeny vztahy mezi agenty v závislosti na jejich vzdálenosti a tvaru, popřípadě čase. V prostorovém MAS je možné kromě množiny agentů a objektů definovat i tzv. pole. Tyto pole slouží k předávání informací mezi agenty, popřípadě mezi agenty a objekty a jsou šířeny prostorem v závislosti na funkci šíření. V klasickém MAS probíhá komunikace mezi agenty pouze na základě adresné komunikace, založené na zasílání tzv. zpráv. Příjemci zprávy jsou agentem vyhledáni na základě poskytovaných služeb registrovaných u agentové platformy, nebo jsou vybráni na základě znalosti poloh ostatních agentů ve svém okolí. Na rozdíl od tohoto způsobu, je komunikace založená na šíření polí neadresná, platná pro určitý prostor a typ agentů. Pole  $field : f \in F$  je definováno svým zdrojem (objekt, agent), informační hodnotou (číslo, zpráva, objekt), porovnávacím pravidlem a funkcí šíření [2]. Pole může mít v závislosti na vzdálenosti od zdroje různou intenzitu definovanou funkcí šíření. Porovnávací pravidlo slouží k selekci agentů, které jsou schopny vnímat toto pole (informaci šířenou polem zachytí pouze agenty s definovaným pravidlem pro zachycení pole). Díky svým vlastnostem je komunikace založená na metodě šíření polí určena k modelování reálných polí, jako je například šíření zvuku prostorem. Metoda šíření pole je závislá na reprezentaci prostředí MAS, pole se například může šířit podél hran grafové struktury, jehož hrany definují místa v prostoru mezi kterými se agenty pohybují. V případě rastrové reprezentace prostoru je pro šíření pole možné využít paradigmatu celulárních automatů.

### 2.3.2 Definice modelování s využitím agentového přístupu

Modelování založené na agentovém přístupu - ABM (z anglického Agent Based Modelling) patří podobně jako celulární automaty do skupiny modelů s přístupem zdola nahoru. Tedy modelů, které se snaží popsat realitu od jeho konkrétních částí směrem k obecnějším. Tento postup je opačný k přístupu shora dolů, jež nahlíží na systém jako celek a popisuje zkoumaný systém od nejabstraktnější úrovně ke konkrétnějším částem. ABM využívá poznatků z teorie her, distribuovaných systémů a objektových

technologií. Tento relativně nový koncept modelování nemá podobně jako koncept MAS univerzální definice. ABM lze definovat například takto:

ABM je modelování založené na množině interagujících agentů umístěných v simulačním prostředí. V modelu jsou definovány vztahy, jež spojují agenta(y) nebo objekty prostředí do jednoho systému. Vztahy mohou být definovány mnoha způsoby, od jednoduchých reaktivních vztahů (tj. agenty pouze vykonávají akce jako reakce na nějaký vnější podnět nebo akce nějakého jiného agenta) až po cílově orientované (sledující daný úkol na základě znalostí). Chování agentů může být plánováno synchronně (tj. agenty mohou provádět akce v globálních časových krocích) nebo asynchronně (tj. agenti plánují akce v závislosti na ostatních agentech a (nebo) v závislosti na vlastních hodinách) [8].

Hlavním přínosem ABM je schopnost relativně jednoduchým způsobem vytvořit model heterogenních a komplexních systémů, který je těžko popsatelný pomocí globálních matematických funkcí. Při vytváření modelu jsou nadefinovány základní entity systému a popsáno jejich chování a vlastnosti. Nadefinované entity se dělí na objekty prostředí (cesty, budovy, pole, řeky) a na agenty, vykonávající určité činnosti v tomto prostředí. Chování systému jako celku je pak založeno na interakci agentů mezi sebou a na vzájemném působení objektů prostředí a agentů.

## 2.4 Reprezentace prostředí v CA a ABM

Na rozdíl od celulárních automatů, které mají explicitně definováno prostředí pomocí sítě buněk, není koncept MAS vázán na konkrétní reprezentaci prostředí (u některých MAS prostředí ani není požadováno). Jednou ze specifických oblastí využívajících ABM jsou prostorové simulace (geosimulace). Jak již bylo zmíněno, pro tento typ simulací je prvek prostředí klíčový, neboť umožňuje zapojení prostorových dat popisujících zkoumaný systém. Jako zdroj dat pro geosimulace jsou nejčastěji využívány GIS, jež obsahují geodata potřebná pro vytvoření modelu prostředí. GIS využívá pro ukládání dat dvou základní datových modelů, rastrového a vektorového modelu, od nichž se do značné míry odvíjí i podoba reprezentace prostředí pro ABM.

Drtivá většina dnešních modelů založených na agentech využívá pro reprezentaci prostoru sítě buněk vycházejících z rastrového modelu. V poslední době se však stále častěji objevují i modely, založené na objektově orientovaném přístupu, vycházejícím z vektorového modelu, popřípadě hybridní modely, jež kombinují výše zmíněné modely dohromady. Popisem možných způsobů reprezentace prostoru se zabývají následující kapitoly.

### 2.4.1 Využití rastrových dat pro ABM

Rastrový model vychází z rozdělení rovinného prostoru pravidelnou mříží na jednotlivé dílky, označované jako buňky (angl. cell), které představují nejmenší, dále



zpravidla nedělenou prostorovou jednotku [36]. V takto definované síti buněk jsou informace o tvaru, velikosti a neprostorových vlastnostech geoprvků uloženy pomocí hodnot v jednotlivých buňkách. Výhodou je snadná definice vztahů mezi buňkami, například definice sousedství a určování vzdálenosti (měří se počtem buněk). Nevýhodou je reprezentace prostorově větších geoprvků složených z několika buněk, neboť v tomto modelu nelze explicitně definovat geometrii geoprvků. V GIS se tento model využívá především pro překryvné operace, reprezentaci DMR (např. ESRI Grid) a vyhledávání cesty.

Jak již bylo zmíněno, koncept MAS se dá považovat za rozšíření konceptu CA. Díky tomu byla přirozeně přijata reprezentace prostředí sítě buněk i pro MAS. Do nedávné doby většina výzkumníků v oblasti ABM využívala regulární síť podobnou CA, kde agenti mohly cestovat mezi buňkami. CA byly interpretovány jako agentově založené modely, jejichž stavy se ukládaly do buněk [5]. Kombinace CA a MAS se v určitých případech jeví jako výhodná, neboť využívá jednoduché reprezentace prostoru pomocí CA kombinované s autonomností MAS, přinášející volnost pohybu agentů. Z důvodu jednoduchého návrhu je rasterový model velice oblíbený a rozšířený pro definici prostředí v ABM.

Příklady geosimulací kombinujících celulární model prostředí a MAS najdeme v celé řadě oborů od modelování sociálního chování [48] přes urbanismus [6] až po simulace šíření (plyn, požár). V případech simulací individuálních mobilních agentů se jejich tvar a velikost omezuje pouze na jednu buňku sítě buněk, což do značné míry zkresluje výsledek vytvořených modelů.

#### 2.4.2 Využití vektorových dat pro ABM

Vektorový datový model popisuje prostorové objekty pomocí dvou složek, geometrické a popisné. Geometrickou složku lze popsat pomocí tří základních geometrických prvků: bodu, linie a polygonu. Každý geometrický prvek je definován posloupností bodů lokalizovaných souřadnicemi v daném souřadnicovém systému. Popisná složka je uložena ve formě relační databáze a popisuje všechny negeometrické vlastnosti geoprvků. Obě složky jsou provázány pomocí jedinečného identifikátoru.

V případě vektorového modelu je svět rozdělen do několika tematických vrstev, shromažďujících geoprvky stejného typu. Naproti tomu v ABM je pojetí světa tzv. agentově zaměřeno, tedy každý agent má individuálně uloženy kompletní informace, a to pouze o geoprvcu, který reprezentuje. Aby bylo možné využít vektorových dat z GIS pro ABM, je třeba nejprve převést data z vrstev do podoby agentů [9]. Převod je založen na vyhledání všech informací z jednotlivých vrstev týkajících se daného geoprvcu (geometrické i atributové složky) a jejím zapouzdřením do agentů určitého typu, popřípadě do klasických objektů. V některých případech, lze jednoduše vytvářet agenty z prvků jedné vrstvy. Příkladem může být vrstva majitelů domů, jež je



reprezentována vrstvou polygony domů a atributovou tabulkou (viz tab. 2).

ID	Vlastnik	CP	Typ
1	Pepa	15	rodinný dům
2	Tonda	1212	garáž
3	Jana	49	byt

Tabulka 2: Atributová tabulka vrstvy nemovitostí.

Každý dům je reprezentován geometrií a záznamem o vlastníkovi, popřípadě dalšími informacemi. V tomto případě dojde k vygenerování čtyř agentů, které budou reprezentovat jednotlivé nemovitosti. V některých případech je ovšem nutné spojit informace z více vrstev (tento případ bude dále rozebrán v kapitole 6.6.2).

Výhodou vektorových dat je vnesení geometrie do agentově zaměřených modelů. Geoprvky lze reprezentovat pomocí bodů, linií a polygonů, tedy je zde explicitně definovaný jejich tvar a velikost [9]. Různorodostí tvarů a velikostí agentů, popřípadě objektů prostředí, lze dosáhnout větší komplexnosti a přesnosti modelu, než je tomu při využití rastrové (buněčné) reprezentace prostoru. Vektorový model dat je také výhodný pro návrh a implementaci modelu pomocí dnes rozšířenějšího objektového programování. Nevýhodou tohoto modelu je však větší výpočetní náročnost výpočtu prostorových vztahů a také větší náročnost na představivost tvůrce modelu, protože topologické vztahy jsou ve vektorovém modelu nepoměrně složitější než v rastrovém modelu.

### 2.4.3 Využití hybridního modelu pro ABM

Hybridní model je speciální případ, který kombinuje vektorový a rastrový model. Tento model je výhodný v případě, že je potřeba zachovat rastrovou reprezentaci prostoru a vstupní data jsou ve vektorovém formátu. Reprezentovat území, na němž se rozkládá například silniční síť ČR pomocí pravidelné sítě buněk, je nevýhodná, neboť buňky reprezentující komunikace by využívaly jen zlomek z celé sítě buněk. Proto je výhodné využít liniových a bodových geoprvků pro reprezentaci sítě ulic a vnitřní prostorovou reprezentaci geoprvků rozdělit na pravidelnou síť buněk. Tento model navíc dovoluje pracovat s jednotlivými geoprvky jako objekty, popřípadě agenty, což dále zjednodušuje komunikaci mezi nimi a mobilními agenty. Další výhodou je také snadná distribuovanost jednotlivých částí modelu. Nevýhody tohoto modelu jsou hlavně v náročnějším návrhu a implementaci prostorových vztahů, implementace viditelnosti a zajištění integrity dat v tomto modelu. Praktické zkušenosti s využitím tohoto modelu jsou popsány v kapitole 6.4.1.

#### 2.4.4 Omezení reprezentace prostoru a času v dynamických prostorových modelech

Při vytváření prostorových modelů jsou modelované jevy omezeny datovým modelem vstupních dat. Pokud vycházíme z dat GIS, bude tvorba modelu omezena reprezentací prostoru v GIS. V předchozích kapitolách byly stručně popsány reprezentace prostorových dat v GIS. Zde je uveden souhrn omezení plynoucích z uvedených datových modelů:

- Na rozdíl od reálného trojrozměrného prostoru, GIS standardně pracují s dvourozměrným prostorem [37], popřípadě v tzv. 2,5D prostoru (v popisné složce geoprůvku je uložena informace o výšce). V případě síťových analýz se dokonce pracuje pouze v jednorozměrném prostoru.
- Dalším zjednodušením prostoru je jeho způsob reprezentace a adresace geoprůvků. V GIS existují dva základní přístupy:
  - diskrétní - prostor je rozdělen pomocí sítě diskrétních buněk (viz 2.4.1). Rastrový model zjednodušuje reálný prostor jen na konečný počet míst a také omezuje tvar a minimální velikost objektů, protože nejmenším adresovatelným elementem prostoru je buňka s daným tvarem a velikostí.
  - spojitý - spojitá reprezentace odpovídá v GIS vektorové reprezentaci (viz 2.4.2). Vektorový model je bližší realitě, neboť objekty můžou být umístěny kdekoli v prostoru (omezením je pouze přesnost vyjádření souřadnic určujících jeho polohu). Tvar objektů je zde částečně zkreslen, neboť objekty jsou reprezentovány posloupností vektorů (bod, linie, polygon).

Způsoby modelování prostorových jevů úzce souvisejí se způsobem reprezentace a modelování času. Časová složka je v prostorových dynamických modelech nejčastěji reprezentována diskrétně, pomocí tzv. časových kroků. V každém časovém kroku jsou aplikována pravidla, popřípadě chování na modelované objekty (popřípadě agenty), jež mají za důsledek změnu jejich prostorových nebo neprostorových vlastností. Časové kroky mohou být globální (platí pro všechny objekty, agenty) nebo lokální (platné jen pro určité modelované objekty, agenty).

## 2.5 Existující řešení v oblasti ABM

Za účelem ABM vzniklo několik vývojových platform s různou škálou možností definice modelu. Zpočátku byly platformy navrženy tak, že tvůrci modelů neměli příliš možnost rozšiřovat funkcionalitu, například co se týče definice prostředí. V dnešní době se hlavně díky objektově orientovanému přístupu daří propojovat simulační prostředí s knihovnami dalších aplikací. V oblasti geosimulací jsou to hlavně knihovny

GIS aplikací, které umožňují integrovat GIS funkce do simulačních prostředí ABM. Podle [27] existují čtyři způsoby propojení GIS a agentových platform:

- propojení s **volnou vazbou** (loose coupling) - simulační software a GIS jsou dva rozdílné produkty a integrace je realizovaná daty. Tedy data z GIS jsou použita na vstupu simulace a výsledek simulace je opět zapsán do těchto dat pro následné zpracování v GIS. Příkladem takového spojení je AgentAnalyst, který slouží ke geosimulacím a integruje simulační prostředí Repast a GIS aplikaci ArcMap.
- propojení s **těsnou vazbou** (tight coupling) v tomto způsobu propojení je GIS funkcionality implementována do simulačního systému, nebo naopak simulační systém je integrován do GIS.
- **přímé kooperativní** spojení - GIS nebo Simulační systém pracuje jako server nebo klient a spojení je zajištěno pomocí nadefinovaného rozhraní mezi aplikacemi.
- **nepřímé kooperativní** spojení - spojení je zajištěno třetím softwarem.

Kromě stupně integrace ABM aplikace a GIS existují ještě další omezení. Reprezentace prostředí v simulačních systémech bývá velice často omezena jen na určitý typ (např. pouze rastrová reprezentace) a jen na předdefinovanou velikost a tvar okolí agenta (např. Neumanovo nebo Moorovo). Dalším omezením v rozšíření funkcionality prostředí je neexistence API funkcí, uzavřený kód nebo použití vlastního programovacího jazyka (např. NetLogo), což omezuje vývoj další funkcionality [8].

V dnešní době existuje již celá řada aplikací zaměřených na ABM a geosimulace. Některé jsou úzce zaměřeny na určitou oblast, například aplikace OBEUS [4] je zaměřena na urbanistické modelování, jiné jsou navrženy pro jednoduché pochopení problematiky ABM a tedy nejsou vhodné pro realistické modelování (AgentSheets). Z pohledu této dizertační práce jsou však nejzajímavější aplikace pracující s reálnými daty z GIS, popřípadě ty, které jsou nějakým způsobem propojeny s GIS aplikacemi. Mezi nejznámější platformy schopné pracovat s reálnými daty patří OBEUS, SWARM, Repast [8]. Poslední zmíněný je na rozdíl od ostatních schopen pracovat kromě rastrových dat i s daty vektorovými, a to díky integraci knihoven z projektů OpenMap, Java Topology Suite a GeoTools, určených pro práce jak s rastrovými, tak i vektorovými daty.

V rámci projektů Logika a umělá inteligence pro multi-agentové systémy [50] je na univerzitě VŠB-TU Ostrava vyvíjeno simulační prostředí, jehož úkolem je ověření možností umělé inteligence pro krizové řízení a simulace reálných systémů. Vyvíjený simulátor je zaměřený na případovou studii modelování silniční dopravy. Při vývoji bylo využito kombinace platformy JADE (platforma pro vývoj MAS) a GIS knihoven. Díky zvolené architektuře je simulátor schopný integrovat nástroje pro logiku

a umělou inteligenci spolu s nástroji pro práci s daty z GIS. Tato práce navazuje na dizertační práci Pavla Děrgela zabývající se prostorovými MAS a implementací zmiňovaného simulátoru. Výsledky této předložené práce poslouží pro další rozšíření reprezentace modelu prostředí v simulátoru a zdokonalení jeho vizualizačních nástrojů.

## 2.6 Příklady prostorového modelování

Oblasti pro využití agentově zaměřených modelů jsou prakticky neomezené. Zde jsou uvedeny odkazy na práce modelující například archeologické rekonstrukce dávných civilizací [1], biologické modelování infekčních chorob [19], modelování ekonomických procesů [39], chování lidí při nakupování, chování davu při demonstracích [48], sociální sítě teroristických skupin [35] a dopravní simulace. Další kapitoly popisují několik konkrétních projektů s důrazem na způsoby reprezentace prostoru.

### 2.6.1 Modelování s využitím rastrového modelu

MAGS systém (z angl. MultiAgent Geo-Simulation) je obecná platforma pro simulace v reálném čase, navržená až pro tisíce agentů využívajících znalostí a schopných navigace ve 2D nebo 3D virtuálním prostředí. Agenty systému MAGS mají schopnosti vnímání, navigace, pamatování si znalostí, komunikace a autonomního chování v prostředí založeném na geografických datech. Jsou schopny vnímat elementy obsažené v prostředí a autonomní navigace reagující na změny prostředí. MAGS je využit pro modelování chování davu v městském prostředí, chování zákazníků v obchodních centrech a dalších oblastech [48].

V tomto projektu je využito několik zdrojů prostorových dat z GIS pro reprezentaci prostředí. Topografická data města Qubec City v měřítku 1:20000, digitální model reliéfu, a vrstva budov se základními informacemi (výška budov). Virtuální prostředí je založeno na několika vrstvách rastrů, kde každý reprezentuje jiný druh informací. Jsou zde bitové mapy reprezentující překážky (stavby, zdi), výšková mapa (výšky terénu + výška překážek), rastr reprezentující cesty (hodnoty buněk udávající typ komunikace) a mapa poloh agentů. Dále lze přidávat další mapy reprezentující další prostorové jevy, jako například šíření plynu, a to pomocí rozšiřujících modulů. Pro vnímání okolí agentů je využito trojúhelníkového výhledu do určité vzdálenosti ve směru před agentem. Vnímání okolí je také omezeno na základě výškové mapy, tedy agent vnímá pouze objekty, které nejsou zakryty vyššími objekty. Modelování dopravy je zde řešeno pomocí externího komerčního produktu AIMSUN.

Hlavním přínosem tohoto projektu je komplexní model prostředí, zahrnující jak mapu využití terénu, tak i mapu výšek. Agenty jsou schopny vnímat okolí na základě viditelnosti, jež je omezena výškami objektů prostředí. Z prezentovaných materiálů projektu je však patrné, že pro simulaci se využívá agentů s jednoduchou prostorovou

reprezentací. Jak tvar, tak i velikost agentů je reprezentována buňkou rastru, což omezuje možnosti modelování větších a tvarově složitějších mobilních agentů.

### 2.6.2 Modelování s využitím vektorového modelu

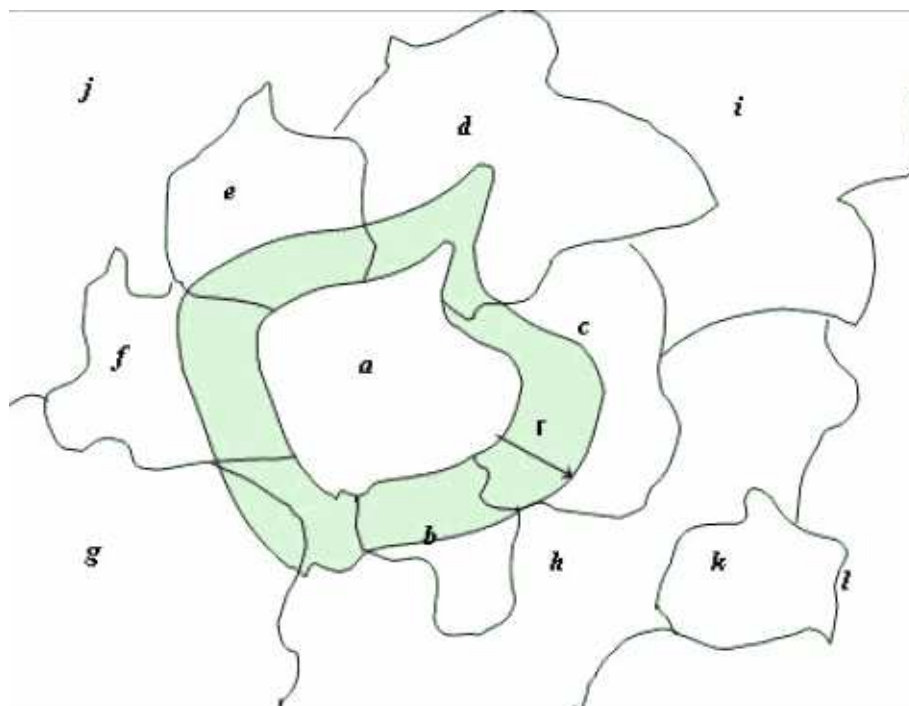
Práci zabývajících se prostorovým modelováním s využitím vektorových dat je zatím velmi málo. Práce s názvem Vektorově orientované celulární automaty schopné měnit tvar [33] se zabývá rozšířením modelu celulárních automatů o reprezentaci prostoru pomocí nepravidelných polygonů. Nový způsob modelování je určen pro modelování využití území a zahrnuje srovnání s modelováním klasickým celulárním automatem. Důvod pro přechod na vektorový model vychází ze zkušeností závislosti celulárních modelů na měřítku (velikosti buňky) a na konfiguraci okolí [26] [11] [31] [29]. Pro ověření nového modelu byla zvolena oblast v okolí města Quebec v Kanadě. Nový model je postaven na myšlence celulárního automatu (definici prostoru, okolí a tranzitivních pravidel) upraveného pro vektorový datový model.

- **prostor** je tvořen kolekcí geografických objektů nepravidelných tvarů (bod, linie, polygon). Každý geoprvek se vyvíjí na základě tranzitivních funkcí a změn svého okolí v čase. Každý geoprvek odpovídá reálné entitě studovaného systému (například les, zástavba, jezero, cesta).
- **okolí** je definováno jako území (obalová zóna) ovlivňující geoprvek uvnitř (viz obrázek č. 4).
- **tranzitivní funkce** je definována podobně jako u klasických celulárních automatů. Na základě tranzitivní funkce a hodnot geoprvků v okolí se mění hodnota středového geoprvku.

Implementace tohoto modelu využívá objektově-orientovaného paradigmatu. V projektu byla využita GIS knihovna pro práci s topologií JTS. Výsledky modelování v porovnání se skutečným stavem vycházejí ve prospěch vektorových CA. Vektorové CA také omezují závislost výsledku simulace na měřítku. Nevýhodou vektorových celulárních automatů je jejich vysoká výpočetní náročnost [34].

### 2.6.3 Modelování nad hybridním modelem

V rámci projektu Logika a umělá inteligence pro multi-agentové systémy realizované na VŠB-TU Ostrava bylo rozhodnuto o vytvoření případové studie v oblasti dopravní simulace za účelem ověření hypotéz na praktickém příkladu v prostředí postaveném na reálných datech. Návrh silničního modelu byl inspirován existujícími modely simulujícími pohyb vozidel pomocí celulárních automatů [38]. Z existujících projektů byl převzat a dále rozpracován způsob reprezentace prostoru, ukládání poloh entit systému a šíření polí. Model byl postaven nad daty uloženými ve vektorovém formátu

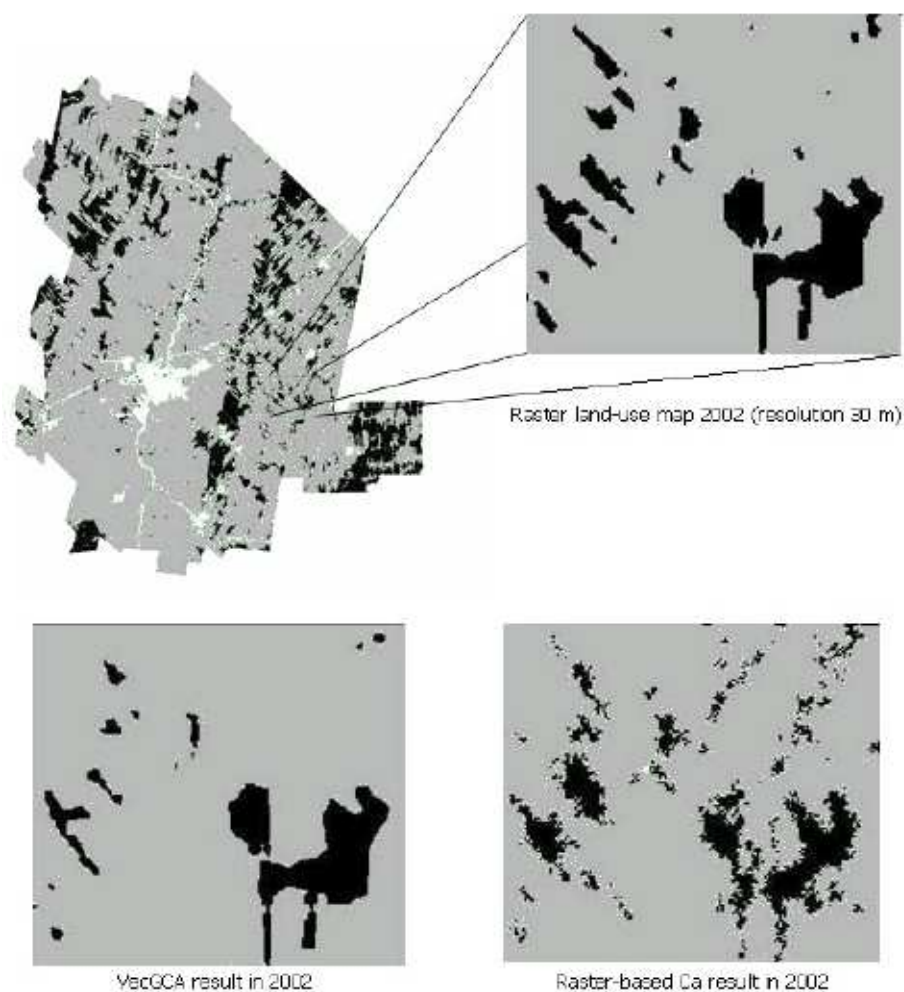


Obrázek 4: Definice celulárních automatů pomocí polygonů. Objekt A, vzdálenost sousedství  $r$  zahrnující objekty b,c,d,e,f,g,h (převzato z [33]).

ESRI Shapefile. Z důvodu velkého rozsahu dat a potřeby komunikace infrastruktury s mobilními agenty byly jednotlivé části silniční sítě zapouzdřeny do softwarových agentů. Z pohledu reprezentace prostředí tak byl vytvořen hybridní model prostředí kombinující jednoduchost simulace pohybu pomocí celulárních automatů a distribuovanost zajištěnou MAS [15] [14] [13]. Síť buněk byla vytvořena na základě délky úseků (rozdělením do buněk po 5 metrech) a počtu jízdních pruhů úseku (každý pruh je reprezentován jednou řadou buněk). Pro uchování více informací vztahujících se k jednomu místu byl v každé buňce vytvořen odkaz na objekt, obsahující všechny informace situované k danému místu. Kromě informací o identifikátoru úseku, dopravním směru, obsahuje také hodnoty polí, které šíří dopravní značky a automobily (mobilními agenty). Informace uložené v buněčné síti sloužily k prostorovému rozhodování mobilních agentů. Buněčná síť tak tvoří médium pro ukládání informací o polohách, rychlostech agentů a omezeních definovaných dopravními značkami. Podrobný popis struktur a šíření polí je rozepsán v [12].

V průběhu implementace se ovšem ukázal tento model jako poměrně náročný. Hlavní problémy se objevily v realizaci distribuované buněčné sítě a také výpočetní náročnosti šíření polí. Porovnání modelů a zkušenosti s jejich implementací jsou podrobně popsány v kapitole 6.4.





Obrázek 5: Porovnání výsledků modelování pomocí vektorových a klasických CA se skutečným vývojem (převzato z [34]).

#### 2.6.4 Zhodnocení

V oblasti prostorového modelování navazuje ABM na modelování založené na celulárních automatech, což ho do značné míry ovlivnilo. Hlavním důvodem používání a také hlavní výhodou celulárního automatu pro reprezentaci prostoru v ABM, tedy sítě buněk, je beze sporu zjednodušení popisu prostoru. Entity systému mohou být umístěny jen do buněk sítě, což dále zjednodušuje definici okolí entity, které je zásadní pro prostorové rozhodování, popřípadě simulaci pohybu. Bohužel, tento model má i řadu nevýhod, mezi něž patří statické rozmístění míst v prostoru, omezený počet směrů, problematické modelování tvarově složitějších a větších objektů než základní buňka. Prostorová přítomnost objektu je v tomto modelu určena pouze nepřímým zaplácáním, například odkazem na objektově-orientovanou reprezentaci do buněk sítě. Geometrie a umístění objektu složeného z více jak jedné buňky je proto zde velice

špatně popsitelné a adresovatelné [9]. Z tohoto důvodu fungují prostorové simulace, které jsou postaveny nad tímto modelem buďto na principu celulárního automatu (aplikace tranzitivních pravidel v okolí buňky), nebo simulují chování entit pomocí autonomních agentů o velikosti jedné buňky, což do značné míry omezuje možnosti simulace. Alternativu k tomuto způsobu popisu prostoru je objektově orientovaný model využívající vektorových geometrií a kontinuální popis prostoru. Tento model bohužel není dosud dostatečně rozšířen, což se projevuje nedostatkem nástrojů pro modelování a simulaci systémů na nich založených.



### 3 Nedostatky dnešních platforem pro ABM

Přes velký pokrok ABM v oblasti prostorového modelování je využití tohoto způsobu modelování stále v rané fázi. Jak již bylo zmíněno, drtivá většina dnešních vývojových platforem dovoluje vytvářet model pouze nad rastrovým datovým modelem a jen málo z nich umožňuje reprezentovat objekty (agenty) pomocí vektorových geoprvků. Tento stav je do značné míry zapříčiněn historickými důvody, kdy ABM využívalo zkušeností z modelování postaveného na celulárních automatech. V poslední době se trend vývoje obrací spíše k tzv. objektově orientovanému způsobu reprezentace prostředí, využívajícího spojitou prostorovou reprezentaci a explicitně vyjádřené geometrie agentů a objektů pomocí základních vektorových geoprvků. Díky vyšší prostorové přesnosti dosahují tyto modely lepších výsledků než modely s prostředím reprezentovaným sítí buněk (příkladem jsou projekty [33] [10]). Dalším problémem v oblasti simulace reálných systémů je chybějící provázanost s GIS obsahující reálná data. Existující řešení buďto využívají volnou vazbu mezi simulačním prostředím a GIS aplikací, což do značné míry omezuje interaktivně pracovat s modelem nebo nabízejí integraci GIS knihoven (GeoTools, Java Topology Suite) pouze na programátorské úrovni. Vývoj modelů je tak spíše soustředěn na implementaci chybějících nástrojů pro práci s prostorem, než na modelování samotné. Do budoucna bude potřeba rozšířit stávající platformy o standardní nástroje pro práci a rozhodování v prostoru a také doplnit o nástroje pro import a následné převedení prostorových dat do podoby agentů, popřípadě objektů prostředí. Předložená dizertační práce se zaměří na vývoj platformy, která bude využívat vektorovou reprezentaci prostoru a bude obsahovat nástroje pro import dat z GIS pro oblast dopravních simulací. Pro realizaci bude využito existujícího simulátoru vyvinutého na našem pracovišti, který bude upraven pro práci s kontinuálním prostorem. Dále se práce zaměří na možné zdroje dat pro dopravní simulátory a jejich import do modelu, který je založen na MAS.

## 4 Cíle práce

Dizertační práce se zabývá problematikou reprezentace prostředí pro MAS, reprezentace objektů prostředí a způsobům interakce agentů s prostředím. Hlavním cílem je navržení a vytvoření struktury vhodné pro prostorové rozhodování agentů a dále vytvoření nástroje pro import dat do vytvořené struktury z prostředí GIS. Zmiňované úkoly budou řešeny pro oblast dopravních simulací. Tato práce si klade za cíl provedení následujících úkolů:

- Rozšíření definice prostoru z diskrétního na zjednodušený kontinuální prostor pro případovou studii silničního simulátoru. Stávající model sítě reprezentovaný celulárním automatem popsat pomocí hierarchické topologické sítě, tak aby bylo možné pracovat se silniční infrastrukturou z několika úrovní abstrakce.
- Analýza konverze vektorových dat do objektů topologické sítě a jejich využití při komunikaci. Využití poznatků a standardů z oblasti telematiky a inteligentních dopravních systémů. Přehled potřebných parametrů silničních úseků pro potřeby simulace.
- Návrh prostorového rozhodování v rovinném prostoru křižovatek silniční sítě. Analýza využití topologických funkcí a pravidel pro řešení vztahů v rovinném prostoru.

## 5 Metody a prostředky realizace

### 5.1 Standardy

Pro budoucí nasazení vytvořeného simulátoru a také pro využití stávajících metodik je výhodné při návrhu a implementaci využít existujících standardů. Standardy byly využity pro:

- tvorbu simulačního prostředí. Simulační prostředí bylo implementováno na platformě JADE, určené pro vývoj aplikací MAS jež splňuje specifikace FIPA [3]. Specifikace FIPA reprezentuje kolekci standardů, které jsou určeny pro propagaci interoperability heterogenních agentů a jimi nabízených služeb [45].
- návrh modelu silniční infrastruktury. Při analýze a návrhu modelu silniční infrastruktury byly využity struktury a metodiky datové specifikace pro inteligentní dopravní systémy. Norma GDF je mezinárodním standardem ISO 14825:2004 specifikujícím konceptuální a logický datový model a výměnný formát geografické databáze pro aplikace zaměřené na inteligentní dopravní systémy. Obsahuje specifikace možné reprezentace těchto geografických databází (geoprvky, atributy a vztahy), specifikace prezentace obsahu a způsobu jak specifikovat relevantnosti dat (metadata) [47]. Kromě stávající normy GDF verze 4.0 bylo využito i projektu NEXTMap určeného jako základ pro další verzi GDF.
- implementaci nástrojů pro import dat a pro prostorové rozhodování. Pro práci s geodaty bylo využito open-source knihovny JTS (Java Topology Suite), jež plně odpovídá specifikaci Simple Features Specification for SQL vydané Open Geospatial Consortium (OGC). Účelem specifikace je definice standardu SQL schémat pro podporu ukládání, získávání, dotazování a aktualizace kolekcí jednoduchých geoprvků přes API ODBC. Jednoduché prvky jsou definovány abstraktní specifikací OpenGIS jak pro prostorové, tak i neprostorové atributy. Prostorové atributy jsou definovány jednoduchými dvourozměrnými geoprvky prvky s lineární interpolací mezi vrcholy [49].

### 5.2 Navigační a silniční data

Za účelem ověření modelu silniční sítě pro simulaci pohybu automobilů, pomocí inteligentních mobilních agentů, bylo potřeba najít vhodná reálná data s dostatečnými informacemi o silniční infrastruktuře. Kromě zaměřených dat areálu VŠB-TU Ostrava vytvořených podle navrženého hierarchického topologického modelu (viz kapitola 6.1), bylo využito také pasportizačních dat oddělení Silniční databanky Ostrava.

Data jsou určena pro potřeby monitorování stavu silniční infrastruktury silnic a dálnic spadající pod správu ředitelství silnic a dálnic ČR. Díky širokému rozsahu a detailnosti sledovaných parametrů (informace jsou sledovány do úrovně silničních pruhů) jsou tato data schopná pokrýt nároky navrženého modelu. Na druhou stranu odlišná koncepce struktury dat si vynutila implementaci poměrně složitého nástroje pro konverzi dat do objektů prostředí silničního modelu.

### 5.3 Topologické funkce GIS knihoven

Pro implementaci objektů modelu silniční sítě a simulace pohybu bylo využito open-source knihovny, pro práci s topologií nad vektorovým modelem JTS (JAVA Topology Suite). Pomocí funkcí této knihovny byla vytvořena topologie mezi prvky reprezentujícími silničními úseky a křižovatkami a topologie mezi silničním pruhem. Dále k výpočtu vzdáleností, určování směrů, definici geoprvků, a konverzi dat. Knihovna je schopná pracovat s velkým množstvím souřadnicových systémů, včetně národního souřadnicového systému S-JTSK.

### 5.4 Platforma pro vývoj MAS

Jádrem vyvíjeného simulátoru je opensource platforma JADE. JADE je softwarová platforma, která poskytuje základní mezivrstvu funkcionality, která je nezávislá na určité specifické aplikaci a která zjednodušuje realizaci distribuovaných aplikací využívajících softwarových agentů. Podstatnou výhodou JADE je implementace pomocí dobře známého objektového jazyka JAVA, poskytujícího jednoduché a uživatelsky přátelské API [3]. Tato práce rozšiřuje již vyvinutý simulátor, vytvořený v rámci dizertační práce Pavla Děrgela Prostorové multi-agentové systémy [12].

### 5.5 GIS nástroje pro import dat a vizualizaci

Pro načtení a zpracování vstupních dat bylo využito open-source projektu OpenJUMP. Tento projekt zastrešuje vývoj aplikace GIS OpenJUMP určené k prohlížení, editaci a analýze prostorových dat. Aplikace je snadno rozšiřitelná pomocí API v jazyce JAVA a velice dobře zdokumentovaná. Pro potřeby modelování byly využity API funkce pro načítání dat z formátů ESRI Shapefile a funkce pro práci s geoprvky. Další využití GIS aplikací bylo pro potřeby vizualizace simulace. Bylo vytvořeno rozhraní, založené na vizualizačním agentu. Toto rozhraní dovoluje připojit libovolný počet klientů pro vizualizaci aplikace. Vizualizační klient byl implementován do ESRI ArcMap pro 2D vizualizaci a pro 3D vizualizaci v aplikaci ESRI ArcScene. Původní verze simulátoru obsahovala vizualizačního agenta pouze pro aplikaci OpenJUMP.

## 6 Realizace a výsledky

Za účelem vývoje a testování logického rozhodování a distribuované reprezentace znalostí pro MAS byla vytvořena případová studie, jejímž cílem je aplikace logického rozhodování a umělé inteligence pro simulaci individuálního chování dopravních prostředků v reálném prostředí. Na základě zadání případové studie byl vytvořen simulátor umožňující modelovat individuální chování dopravních prostředků v prostředí silniční sítě. K tvorbě prostředí silniční sítě budou využita silniční data z GIS. Specifikace případové studie a definice pojmů vychází z výsledků práce týmu ontologů skládajícího se z Martiny Číhalové, Daniely Ďurákové, Lucie Hrubé a Petra Rapanta. Rešerše existujících standardů byla provedena Lucií Hrubou. Autor se zabýval především studiem standardu GDF, datového modelu silničních dat (MultiNet, data silniční databanky Ostrava) a návrhem datového modelu testovacích dat. Autor dále navrhl a implementoval konverzní modul pro data silniční databanky Ostrava. Integrace silniční infrastruktury do simulátoru a implementace simulátoru založeného na MAS byly provedeny společně s Pavlem Děrgelem. Autor na základě zkušeností s vývojem simulátoru, postaveného na MAS hodnotí výhody a nevýhody zvolených způsobů implementace a navrhuje možné rozšíření popisu vnitřní reprezentace křižovatek v silniční síti pro případné rozšíření možností simulátoru.

### 6.1 Specifikace případové studie

Vytvářený model využívá MAS a logiky pro napodobení individuálního chování dopravních prostředků silniční dopravy. Díky využití multi-agentového přístupu je možné vytvářet různé typy dopravních prostředků s individuálně definovaným chováním řidiče a odlišnými technickými vlastnostmi vozidla. Rozhodování agentů je založeno na inferenci znalostí z předdefinované báze znalostí a informací, získaných z prostředí silniční infrastruktury. Výsledný pohyb simulovaných dopravních prostředků vznikne ze vzájemné interakce agentů dopravních prostředků v prostředí definovaném modelem silniční infrastruktury. Definice možností agentů simulujících dopravní prostředky vycházejí z možností reálných vozidel. Jejich definice byla provedena týmem ontologů. Mezi základní chování agentů patří:

- schopnost pohybu mezi zadanými místy v silniční infrastruktuře na základě naplánované trasy. V případě neprůjezdnosti naplánované trasy, schopnost změny trasy.
- schopnost vnímání definovaných typů dopravního značení (horizontálních, vertikálních) do určité vzdálenosti (viditelnosti).
- schopnost vnímání ostatních dopravních prostředků do určité vzdálenosti (viditelnosti).

- schopnost bezpečného průjezdu silniční infrastrukturou s ohledem na aktuální dopravní situaci (zahrnující objetí překážky, předjetí pomalejšího vozidla). Bezpečný průjezd znamená, že simulovaný dopravní prostředek při svém pohybu nezpůsobí kolizi s jiným účastníkem provozu.

Pro zjednodušení simulace budou simulované dopravní prostředky provádět své chování v souladu s dopravními předpisy, tedy jejich pohyb bude vždy podléhat omezením dopravního značení. Kromě definovaného chování jsou určeny omezující vlastnosti dopravního prostředku:

- maximální rychlost
- maximální zrychlení/zpomalení
- maximální brzdná dráha (definuje minimální bezpečnou vzdálenost)
- maximální viditelnost

Z požadavků na schopnosti dopravních prostředků byly specifikovány tzv. atomické akce dopravního prostředku (vehicle). Atomickou akcí se rozumí taková akce, kterou agent provádí na základě rozhodnutí logické jednotky a do jejíž realizace již logická jednotka nezasahuje [51]. Atomické akce jsou následující[51]:

Výchozí stav: Vehicle(poloha, rychlost)

- změna jízdního pruhu (vlevo/vpravo, rychlost)
- jízda rovně (vpřed/vzad, rychlost)
- zapnutí směrovky (levá/pravá/obě)
- vypnutí směrovky (levá/pravá/obě)
- změna rychlosti (rychlost)
- poslání zprávy (zpráva)
- přijetí zprávy (zpráva)

Speciální případy změny rychlosti:

- rozjetí
- zastavení

Kromě agentů simulujících dopravní prostředky mohou být do simulace přidávány i speciální typy agentů. Příkladem je agent parking area, jehož úkolem je kontrola volných míst objektu parkoviště. Atomické akce tohoto agenta jsou [51]:

Výchozí stav: Parking Area (poloha, kapacita, volná kapacita)

Atomické akce:

- poslání zprávy (zpráva)
- přijetí zprávy (zpráva)
- změna čítače (snížení/zvýšení) (znamená změnu čítače volné kapacity)

K dosažení realistické simulace je rovněž potřeba vytvořit podrobný model silniční infrastruktury vycházející z dat skutečné silniční sítě. Požadavky na vytvářený model se dají rozdělit na požadavky na schopnosti agentů simulujících dopravní prostředky (CarAgent) a na požadavky modelu prostředí.

S ohledem na schopnosti a vlastnosti modelovaných dopravních prostředků byly specifikovány tyto požadavky na prostředí (silniční infrastrukturu):

- prostředí musí obsahovat základní prvky silniční infrastruktury: cesty, křižovatky a dopravní značení vycházející z dat skutečné silniční sítě.
- silniční infrastruktura musí být popsána do úrovně jízdních pruhů.
- prostředí musí umožňovat dotazování na polohu, rychlost a směr pohybu dopravních prostředků, popřípadě jiných objektů na silniční síti.
- prostředí musí umožňovat dotazování na polohu a informační hodnotu dopravního značení.
- prostředí musí být formálně popsáno pro potřeby komunikace a logického rozhodování.
- prostředí musí umožnit plánování optimální cesty v rámci silniční infrastruktury.

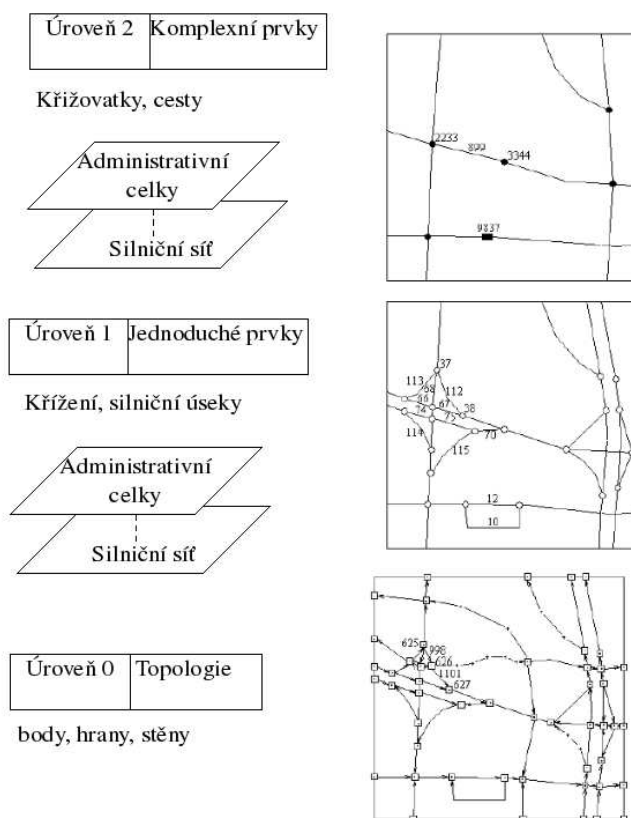
Z definovaných požadavků byl vytvořen seznam úkolů pro realizaci modelu silniční sítě:

- seznámení se s dostupnými zdroji a standardy pro popis a ukládání silničních dat.
- identifikace základních entit silniční sítě.
- návrh a implementace modelu.
- integrace modelu do simulátoru postaveného na MAS.

## 6.2 Analýza standardu pro ukládání silničních dat

Oborem zabývajícím se vývojem aplikací nad silniční infrastrukturou, silniční navigací a ukládáním silničních dat je obor dopravní telematiky. Způsob ukládání geografických dat pro tuto oblast definuje norma ISO 14825:2004 s označením GDF (z angl. Geographic Data File), která na úrovni specifikace definuje způsob a rozsah popisu dopravní infrastruktury. Specifikace obsahuje základní prvky infrastruktury, jejich atributy a vztahy mezi nimi. Norma kromě popisu samotné silniční infrastruktury obsahuje i prvky na ni napojené, jako jsou železniční cesty a napojení a spojení pomocí vodní dopravy (trasy trajektů). Pro účely případové studie bylo využito pouze popisu týkajícího se silniční dopravy. Návrh modelu s ohledem na existující standard přináší jednak využití poznatků týkajících se popisu silniční infrastruktury a také kompatibilitu navržené datové struktury modelu s existujícími datovými sadami vyhovující specifikaci GDF.

Standard GDF nahlíží na silniční infrastrukturu z třech různých úrovní popisu jak je zobrazeno na obrázku č. 6.

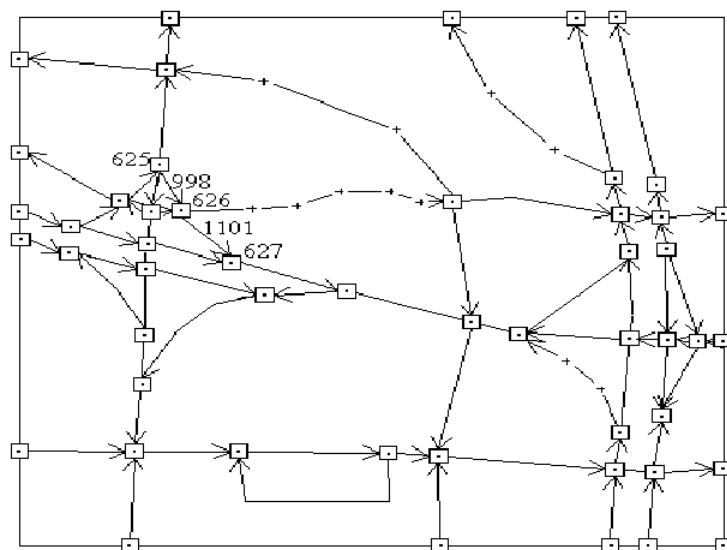


Obrázek 6: Členění popisu dat podle normy GDF. Převzato ze standardu GDF verze 4.0

Úrovně popisu jsou následující [24]:

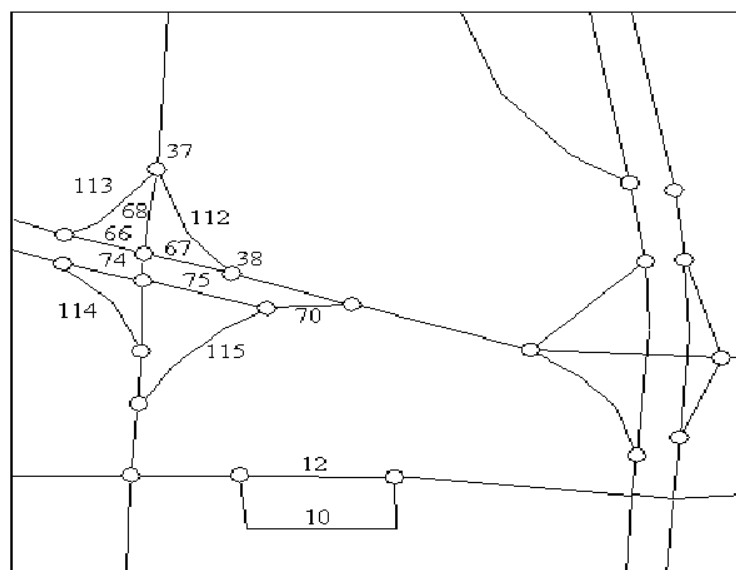


- Úroveň 0 - definuje topologický model silniční infrastruktury. Silniční síť je zde popsána pomocí topologických vztahů mezi základními prvky sítě, kterými jsou body, hrany, a stěny (plochy přilehlé k silniční síti). Kromě prvků silniční sítě je možné do jedné vrstvy úrovně 0 přidat i prvky z dalších tématických vrstev úrovně 1, jako jsou například vodní cesty nebo hranice administrativních jednotek. Důvodem je zapojení prvků těchto vrstev do vzájemné topologie. Výsledná struktura, zobrazená na obrázku č. 7, tvoří topologický rovinný graf.



Obrázek 7: Ukázka reprezentace silniční sítě na úrovni 0. Převzato ze standardu GDF verze 4.0

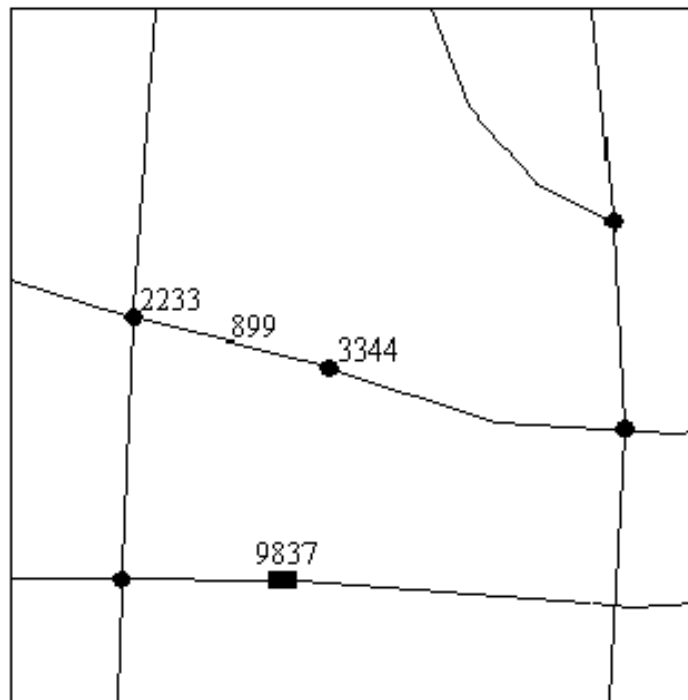
- Úroveň 1 - definuje dva základní typy prvků silniční sítě, silniční úsek (RoadElement) a křížení (Junction). Geometricky jsou tyto prvky reprezentovány body (POINT) a liniemi (MULTILINE). Tato úroveň je popsána tzv. špagetovým modelem. Křížení linií je definováno bodem, označovaným jako křížení (Junction), které určuje místo kde se kříží nebo se spojují dva nebo více silničních úseků. U prostého křížení linií silničních úseků jde o mimoúrovňové křížení (viz. obrázek 8). Geoprvky jsou zde popsány kromě geometrické reprezentace také pomocí množiny atributů a subatributů (popisná složka). Subatribut je pojmem uváděným v normě GDF a slouží k upřesnění rozsahu platnosti atributů. Z pohledu návrhu modelu patří mezi nejdůležitější atributy počet jízdních pruhů, dopravní význam napojení, dopravní směry a dopravní omezení. Výsledná struktura na této úrovni tvoří graf, který však není topologicky korektní.
- Úroveň 2 - Agreguje prvky úrovně 1 do vyšších tzv. komplexní prvků. Jsou zde opět definovány dva typy entit, cesta (Road) a křižovatka (Intersection). Tyto



Obrázek 8: Ukázka reprezentace silniční sítě na úrovni 1. Převzato ze standardu GDF verze 4.0

komplexní prvky se skládají z prvků úrovně 1 a slouží ke generalizovanému pohledu na silniční infrastrukturu. Definují silniční síť pouze jako jednoduchý graf, složený z bodů reprezentujících křižovatky a jejich spojnice - cesty (viz obrázek č. 9). Není zde zachycen skutečný průběh silničních napojení, popřípadě tvar složitých křižovatek. Tato úroveň je určena převážně pro potřeby vyhledávání optimální cesty, popřípadě pro jednoduché zobrazení silniční sítě.

Z analýzy standardu je patrné, že geometrická složka dat popisuje pouze středové osy silničních úseků bez reprezentace silničních pruhů. V případě křížení nebo křižovatek je pomocí bodového geoprisku zachycen střed křížení. Geometrická reprezentace na sebe váže existenci jednotlivých entit silniční infrastruktury. Jízdní pruh zde tedy není definován jako zvláštní entita. Pro zachycení komplexní informace o dopravních omezeních, jako je umístění pruhů v rámci dopravního úseku nebo informace o změně počtu jízdních pruhů, je využito pouze atributů a subatributů. Aby bylo možné vyhovět specifickým požadavkům případové studie je nutné tento popis upravit, zvláště způsob popisu jízdních pruhů. Kromě standardu GDF bylo při návrhu modelu silniční infrastruktury využito i dokumentace projektu NextMAP [23], který se zabývá rozšířením stávající čtvrté verze standardu GDF. Konkrétně bylo využito způsobu zachycení změny jízdních pruhů v rámci dopravní sítě a také jejich způsob popisu.



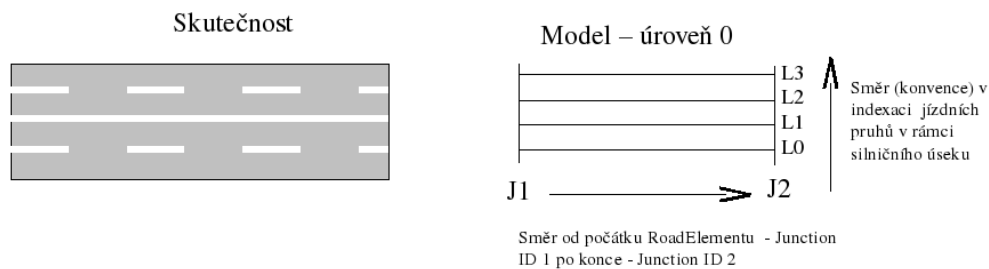
Obrázek 9: Ukázka reprezentace silniční sítě na úrovni 2. Převzato ze standardu GDF verze 4.0

### 6.3 Návrh modelu silniční infrastruktury

Analýza standardu GDF ukázala možnosti a rozsah popisu dnešních silničních dat. Pro potřeby případové studie jsou zde uvedeny všechny potřebné informace o silniční infrastruktuře, ale je potřeba změnit způsob jejich popisu do struktury vhodné pro reprezentaci prostředí pro MAS. Vybrány byly pouze informace o entitách potřebných ke splnění nároků na model, objekty jako jsou mosty, tunely a některé další objekty sledované standardem GDF nebyly do modelu silniční sítě zahrnuty. Ze standardu GDF byly použity tyto entity sítě:

- Road - cesta, spojující dvě křižovatky.
- Intersection - křižovatka definuje místo křížení cest a vymezuje začátek a konec každé cesty.
- RoadElement - silniční úsek je část cesty spojující tzv. místa křížení (Junction), místa kde se napojují dva nebo více silničních úseků (nájezdy na přilehlé dopravní úseky, parkoviště atd.) a také místo, kde se mění počet jízdních pruhů.
- Junction - místo propojení silničních úseků a entita vymezující začátek a konec silničního úseku.

Aby bylo možné určovat polohu a modelovat pohyb dopravních prostředků v rámci jízdních pruhů, jak bylo uvedeno ve specifikaci případové studie, je navíc potřeba definovat novou entitu Lane reprezentující jízdní pruh. Tato entita je definována na základě popisné složky entity RoadElement vycházející z GDF, konkrétně vychází z atributu počtu jízdních pruhů a subatributů vymezujících její platnost. Pro identifikaci entity byla zavedena konvence přidělení číselného identifikátoru od nuly po maximální počet pruhů zprava doleva ve směru od počátku ke konci entity RoadElement. Způsob indexování dopravních úseků je zobrazen na obrázku č. 10.



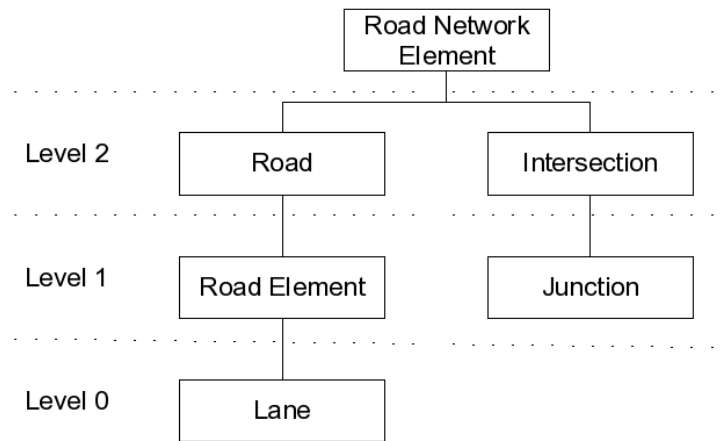
Obrázek 10: Způsob indexování dopravních pruhů v rámci silničního úseku. Informace o počtu a směrech jízdních pruhů vychází z atributů RoadElementu

Výsledný seznam entit vycházejících z analýzy GDF a potřeb případové studie včetně jejich oficiálních názvů (pojmu pro ontologii) je následující [51]:

- RNE - Road Network Element, Prvek silniční sítě
- R - Road, Silnice
- I - Intersection, Křižovatka
- RE - Road Element Silniční úsek
- J - Junction, Spojení (silniční uzel)
- L - Lane, Jízdní pruh

Na základě požadavků byl navržen model silniční sítě tvořený výše uvedenými entitami rozdělenými do tří úrovní, viz. obrázek 11. Na každé úrovni jsou liniové a bodové prvky propojeny do podoby grafu tak, aby bylo umožněno vyhledávání cesty na dané úrovni podrobnosti. Důvodem rozdělení modelu do tří úrovní, je měnící se počet jízdních pruhů mezi uzly sítě a je tedy potřeba podrobnějšího dělení těchto spojnic. Také platnost popisných informací je omezená na entity konkrétní úrovně. Například dopravní omezení dopravních směrů má platnost pro entitu jízdní pruh, kdežto dopravní význam napojení v křižovatce (označení priority jako hlavní

a vedlejší) má význam pro zakončení celého silničního úseku. Dalším důvodem je optimalizace úlohy plánování cesty. Popisem jednotlivých úrovní se zabývá následující podkapitola.



Obrázek 11: Příslušnost nadefinovaných entit modelu k jednotlivým úrovním popisu silniční sítě [21].

### 6.3.1 Úrovně popisu modelu silniční sítě a jejich význam

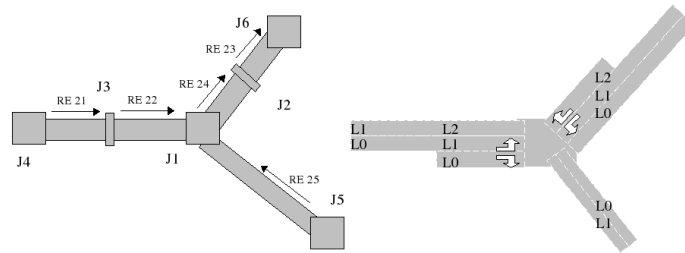
Základní úrovní, ke které se vztahují polohy objektů a agentů, je úroveň 0, obsahující síť jízdních pruhů. Topologie sítě jízdních pruhů je řešena odkazy na navazující pruhy v předcházejícím a navazujícím silničním úseku. Hodnota identifikátoru entity Lane a celkový počet jízdních pruhů v daném úseku slouží k adresaci v rámci úseku. Díky této struktuře je možné CarAgentům předat potřebné informace pro akci změna jízdního pruhu. Dále jsou u každé entity Lane uvedeny informace o dopravním směru a restrikcích popsány pomocí horizontálního dopravního značení. Délka entity Lane je převzata z nadřazené entity z úrovně 1. Celkový seznam atributů entity Lane je uveden v tabulce č. 3.

Název atributu	Datový typ
LaneIndex	Number
ParentRE	RoadElment
Direction	DirectionOfTrafficFlow
Obstacles	List
DirectionRestriction	DirectionCategory

Tabulka 3: Seznam atributů entity Lane

Mění se počet jízdních pruhů v rámci celé sítě je zachycen na úrovni 1 po-

mocí entit RoadElement a Junction. RoadElement definuje část silniční infrastruktury s konstantním počtem jízdních pruhů. Spojnice mezi nimi je definována entitou Junction, která obsahuje údaje o projení jízdních pruhů mezi dopravními úseky (viz obrázek č. 12 a tabulka č. 4). Identifikace entit Lane platí v rámci příslušného elementu RoadElement. Typ napojení určuje, zda jde o přímo pokračující jízdní pruh (Natural) nebo o jiné napojení (Else). Seznamy atributů entit Junction a RoadElement jsou uvedeny v tabulkách 5, 6.



Obrázek 12: Ukázka napojení jízdních pruhů mezi dopravními úseky (RoadElement)

RoadElement1_ID	RoadElement2_ID	Lane1_ID	Lane2_ID	Způsob přechodu
RE 21	RE 22	L0	L1	Natural
RE 21	RE 22	L0	L0	Else
RE 22	RE 21	L2	L1	Natural

Tabulka 4: Ukázka propojení silničních pruhů dvou silničních úseků RE21 a RE22 v entitě Junction

Název Atributu	Datový typ
JunctionId	String
RoutingTable	Map

Tabulka 5: Seznam atributů entity Junction

Úroveň 1 také obsahuje informace o poloze dopravního značení. Každá dopravní značka je vztažena k určitému RoadElementu. Poloha v rámci RoadElementu je definována vzdáleností od jeho počátku a stranou vozovky pro kterou platí. Informační hodnota je definována typem (například omezení rychlosti), popřípadě také hodnotou (50 km/h).

Úroveň 2 je určena pro výpočet optimální cesty v silniční síti. Posloupnost entit RoadElement definovaných na úrovni 1, mezi dvěma křižovatkami, je na této úrovni reprezentována jednou entitou - Road, entita Intersection reprezentuje místo

Název atributu	Datový typ
RoadElementID	String
StartJunction	Junction
EndJunction	Junction
Length	FloatNumber
ParentElement	NetworkElement
DirectionOfTrafficFlow	Direction
TrafficSigns	List

Tabulka 6: Seznam atributů entity RoadElement

spojení entit Road. Pro výpočet optimální trasy tvoří entity Road a Intersection zjednodušený graf silniční sítě. Entita Road obsahuje informace o délce úseku, průměrné rychlosti a povolených dopravních směrech (jednosměrný, obousměrný). Tyto informace jsou použity pro ohodnocení hran grafu. Vyhledávání nad touto vrstvou je jednodušší než nad úrovní 0 nebo 1, neboť obsahuje menší počet elementů. Statické ohodnocení entit Road může být rozšířeno o dynamické ohodnocení, založené na aktualizaci průměrných rychlostí podle rychlostí modelovaných dopravních prostředků, což umožní plánování optimální cesty na základě aktuální dopravní situace. Seznamy atributů entit Intersection a Road jsou uvedeny v tabulkách č. 7 a 8.

Název atributu	Datový typ
IntersectionID	String
Roads	List

Tabulka 7: Seznam atributů entity Intersection

Název atributu	Datový typ
RoadID	String
RoadElements	OrderedList
StartAzimuth	FloatNumber
EndAzimuth	FloatNumber
AverageSpeed	FloatNumber

Tabulka 8: Seznam atributů entity Road

Schématický pohled na navržený model silniční sítě v různých úrovních podrobnosti je zobrazen na obrázku č. 13.

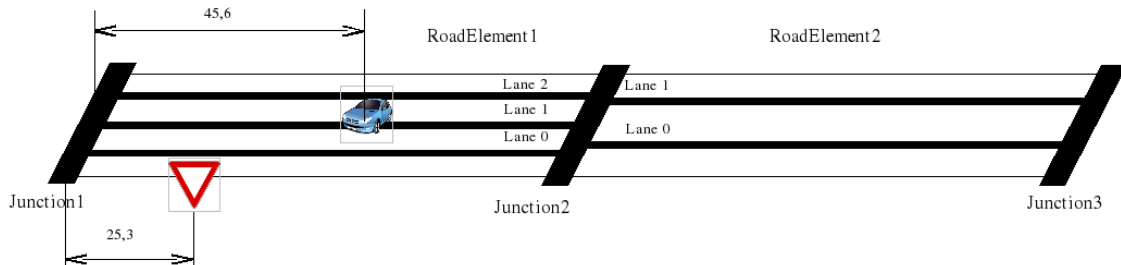
### 6.3.2 Způsoby adresace poloh agentů a možnosti jejich pohybu

Navržený model silniční sítě je určen pro definici prostředí pro agenty simulující dopravní prostředky, dále označované jako CarAgenty a také pasivní objekty jako





lohy vertikálního značení je použito pouze staničení podél entity RoadElement doplněné o informaci, zda je značení umístěno nalevo či napravo ve směru od počátku po konec RoadElementu. Pro ilustraci je na obrázku č. 14 zobrazena definice polohy CarAgentu a dopravní značky.

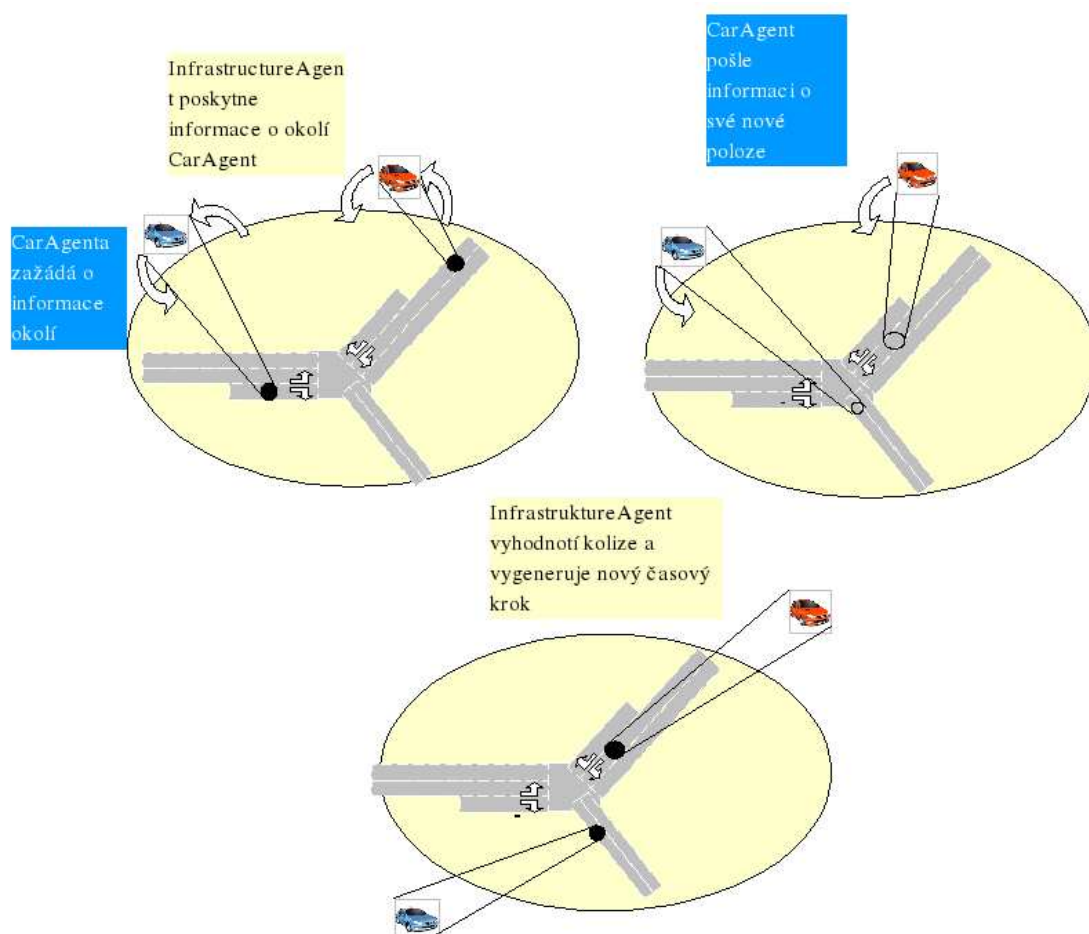


Obrázek 14: Příklad určení polohy agenta simulujícího dopravní prostředek zobrazeného na obrázku je : CarAgent007 (RE1;L1;45,6;right) značka dej přednost v jízdě (RE1;25,3)

### 6.3.3 Zapojení modelu prostředí do MAS

Navržený model prostředí obsahuje popis základních prvků silniční infrastruktury a jejich topologických vztahů. Navržená struktura modelu umožňuje určit jednoznačnou polohu agenta, popřípadě objektu v rámci infrastruktury. Grafová reprezentace dále umožňuje v tomto prostředí vyhledat optimální cestu. Zmíněné možnosti modelu ovšem nepokrývají všechny specifikované požadavky. Mezi zbývajících požadavky patří umožnění CarAgentům vnímat okolní prostředí, tedy získat informace o polohách agentů a objektů v definované vzdálenosti od nich a dále je nutné vytvořit mechanismus pro řešení pohybu agentů a detekci případných kolizí. Tyto funkce samotný model neobsahuje, neboť jeho účelem je pouze popis entit sítě a jejich vztahů. Pro zajištění zbývajících funkcí je model infrastruktury zapouzdřen do speciálního typu agenta nazvaného InfrastructureAgent. Úkolem tohoto agenta je uchovávat polohy všech CarAgentů, popřípadě objektů na silniční infrastruktuře a také znalost její kompletní reprezentace. Dalším úkolem je generování časových kroků, které umožní modelovat změny v čase. V rámci časových kroků generovaných InfrastructureAgentem je CarAgentům umožněna změna jejich polohy na základě definované rychlosti a směru, popřípadě možnost vyměňovat si informace s jinými CarAgenty. Před každým novým časovým krokem, který je platný pro všechny CarAgenty, vyhodnotí InfrastructureAgent možné kolize (dva nebo více CarAgentů se nacházejí na stejném místě) a uloží si jejich nové polohy. Vnímání okolí CarAgenty je řešeno na základě spolupráce (komunikace) s InfrastructureAgentem. InfrastructureAgent, který má jako jediný přístup k modelu silniční infrastruktury, poskytuje každému CarAgentu informace o polohách agentů a objektů do určité vzdálenosti od něj (tzv. viditel-

nosti) [18]. Znázornění významu InfrastructureAgentu jako prostředí pro CarAgenty je znázorněno na obrázku č. 15. Jak bylo popsáno v kapitole 2.3.1, agenty existují v obecném MAS pouze v rámci agentové platformy. Rozšíření obecného MAS o prostředí založené na reálných datech, je v tomto případě řešeno speciálním agentem, který definuje jak prostor, tak i čas simulovaného systému. V případě simulace dopravy rozsáhlých silničních sítí je vhodné rozdělení této sítě do více InfrastructureAgentů, neboť tyto agenty mohou být rozmístěny na více výpočetní stanicích v rámci počítačové sítě, což umožní získat dostatečný výpočetní výkon na provedení rozsáhlé simulace [16].



Obrázek 15: Reprezentace prostředí pro CarAgenty pomocí InfrastructureAgentu s popisem průběhu simulace

## 6.4 Způsob reprezentace prostředí v modelu silniční infrastruktury

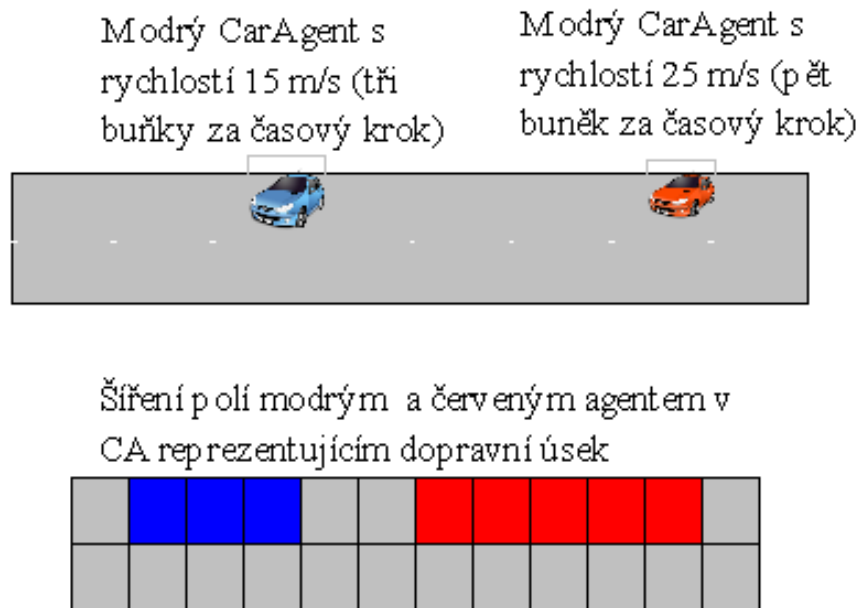
Reprezentace prostředí pro MAS využívá podobně jako tomu je v GIS dvou základních způsobů reprezentace prostoru, kontinuální a diskrétní viz. kapitola (2.4). V průběhu realizace případové studie byly testovány oba způsoby.

### 6.4.1 Diskrétní reprezentace prostoru silniční sítě

V počáteční přípravné fázi vývoje simulátoru bylo testováno vytvoření distribuovaných celulárních automatů na vzorku silniční sítě. Výhodou tohoto řešení je realizace pohybu agentů s využitím tranzitivních pravidel, vycházejících z Nagel/Schreckenbergova modelu, nad celulárním automatem silniční infrastruktury, bez využití logiky na straně CarAgentu.

V navržené diskrétní reprezentaci (prostor je dělen na konečný počet míst) tvoří silniční infrastrukturu síť silničních úseků, vzájemně propojených pomocí typových křižovatek (ručně vytvořené modely křižovatek reprezentované sítí buněk). Každý silniční úsek odpovídající entitě RoadElement a každá křižovatka (entita Junction spojující více jak dvě entity RoadElement) odpovídá jednomu celulárnímu automatu. Vytvoření celulárního automatu v silničním úseku je založeno na rozdělení jízdních pruhů silničního úseku po pěti metrech, tedy přibližné délce osobního automobilu. Pro zjednodušení implementace mají všechny CarAgenty velikost jedné buňky, tedy velikost CarAgentů je v tomto modelu konstantní. Protože délka jízdních pruhů v úseku je stejná, vznikne v rámci RoadElementu pravidelná matice buněk. Hodnoty buněk celulárního automatu jsou v každém časovém kroku nastaveny na základě informací o rychlosti a směru pohybu jednotlivých CarAgentů a také na základě informací o dopravním značení pomocí metody šíření polí [12]. Tato metoda zajišťuje, v závislosti na rychlosti CarAgentu, prostor pro jeho bezpečné projetí určitým počtem buněk před ním tím, že do nich uloží informace o daném CarAgentu. Takto označená políčka určují prostor, kterým CarAgent projede v dalším časovém kroku a nemůže tedy být obsazen jiným CarAgentem, aby nedošlo ke kolizi. Přesun CarAgentů v rámci buněk celulárního automatu zajišťují tranzitivní pravidla, která jsou nastavena tak, aby neumístila CarAgentu do buňky, která je vyhrazena jinému. Podobným způsobem je šířena informace o dopravním značení. Toto pole na rozdíl od polí šířených CarAgenty má pouze informativní charakter a do jednotlivých buněk v rozsahu pole ukládá pouze informace dopravního značení a tím definuje jeho platnost pro určitý prostor sítě. Hodnota pole silničního značení rovněž vstupuje do iteračních pravidel celulárního automatu a ovlivňuje výsledný posun CarAgentu. V navrženém celulárním automatu obsahuje buňka více hodnot najednou. Jednak jsou to informace o dopravním značení a dále také informace o pohybu jednoho CarAgentu. Metoda šíření polí v rámci buněk celulárního automatu je zobrazena na

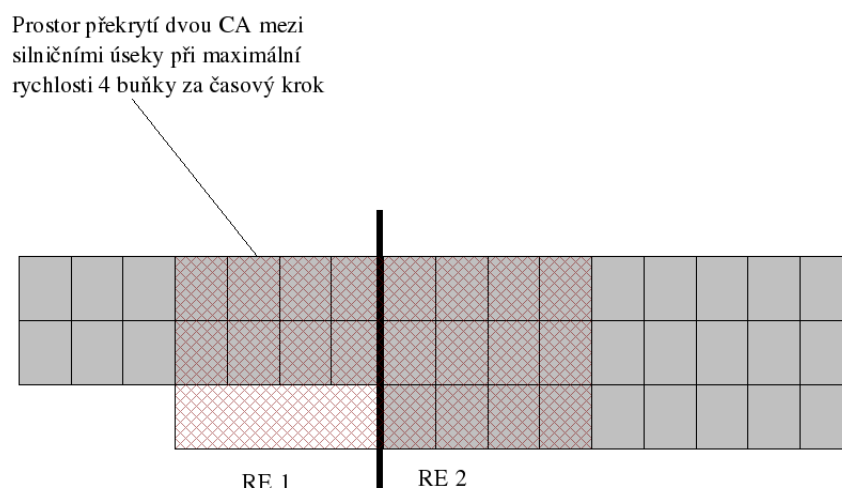
obrázku č. 16.



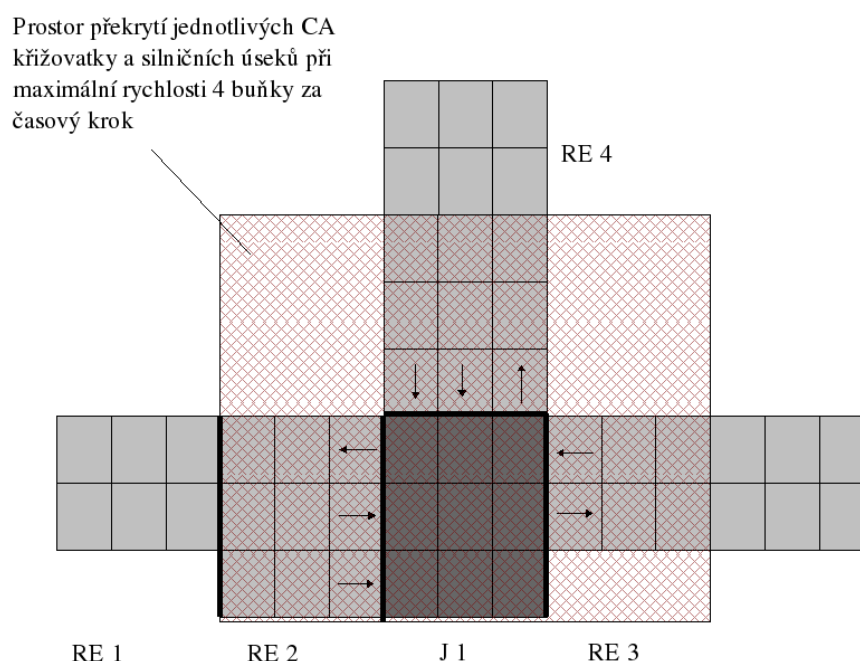
Obrázek 16: Příklad šíření polí CarAgenty v rámci části silničního úseku reprezentovaného celulárním automatem.

Aby metoda šíření polí fungovala správně, je nutné zajistit šíření transparentně do dané vzdálenosti (podle rychlosti agenta) i přes více celulárních automatů reprezentujících jednotlivé části silniční infrastruktury (silniční úseky, křižovatky). To znamená nutnost zajištění prostoru, kterým CarAgent projede i když zasahuje do více CA (v případě, že CarAgent projede přes dva nebo více silničních úseků v jednom časovém kroku). Při implementaci tohoto překrytí je nutné řešit několik problémů a definovat určitá omezení:

- Je nutné nadefinovat pravidla pro přesun CarAgentů mezi CA s různou velikostí, neboť při změně počtu jízdních pruhů dochází ke změně entity RoadElement na níž je pohyb simulován. Z důvodu různého počtu jízdních pruhů sousedních silničních úseků je rozdílná i šířka CA (viz obrázek č. 17).
- Z důvodů distribuované architektury silniční infrastruktury je nutné zajistit překrývání CA silničních úseků vstupujících a vystupujících do křižovatky (viz obrázek č. 18).
- Počet buněk překrývajících se celulárních automatů je závislý na maximální definované rychlosti CarAgentů (počet buněk u kterých je nutné zjistit zda neobsahují pole jiného agenta), což je nutné zohlednit při implementaci.



Obrázek 17: Vyznačená plocha buněk překrytí mezi dvěma silničními úseky.



Obrázek 18: Vyznačená plocha buněk překrytí mezi křižovatkou a napojenými silničními úseky.

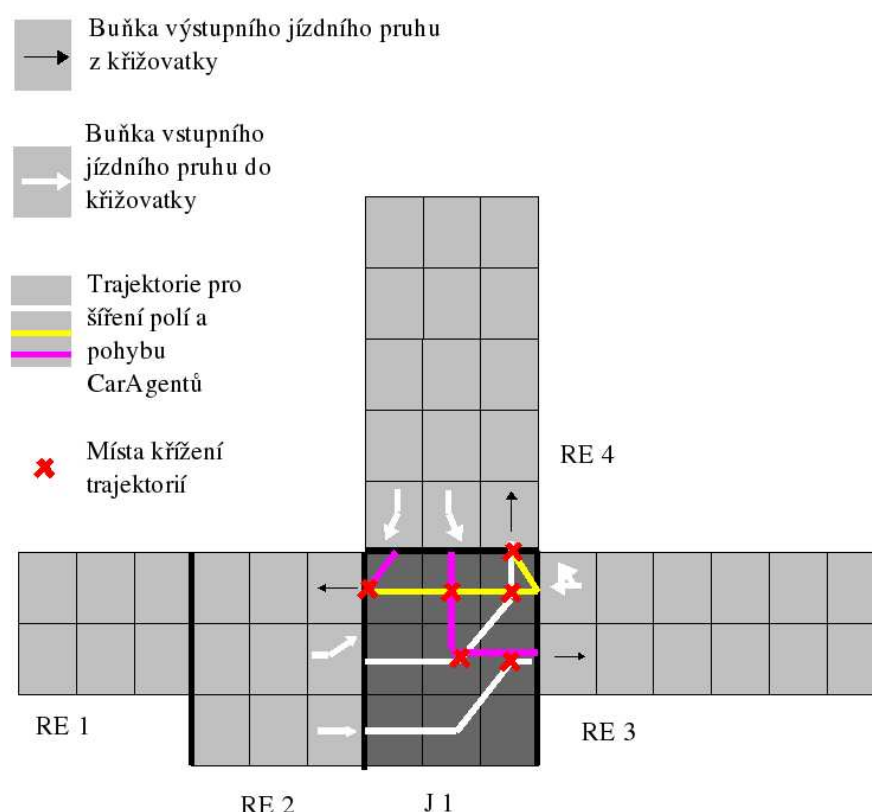
Pro testování funkce CA bylo navrženo rozšíření základních iteračních pravidel, vycházejících z Nagel/Schreckenbergova modelu (viz kapitola 2.2.2), umožňující realizovat kromě pohybu v rámci jednoho jízdního pruhu i pohyb, s možností bezpečného předjetí pomalejšího CarAgentu v silničním úseku se dvěma jízdními pruhy se

stejným dopravním směrem. Pravidlo pro bezpečné předjetí je provedeno v případě, že vzdálenost k předchozímu CarAgentu je menší než jeho rychlost pro další časový krok. Předjetí je rozloženo do dvou fází. V první fázi je zjištěno, zda je v levém pruhu volné místo o velikosti  $v_{max}$  od buňky CarAgentu ve směru opačném k jeho pohybu a místo o velikosti  $v_1$  (rychlosti CarAgentu v dalším časovém kroku) ve směru pohybu CarAgentu. Pokud je podmínka splněna, je CarAgent v této fázi přesunut do vedlejší buňky v levém pruhu a je rozšířeno pole do vzdálenosti odpovídající jeho rychlosti  $v_1$ . V případě, že CarAgent se nachází v levém jízdním pruhu je v první fázi zjištěno volné místo o velikosti CarAgentu v pravém jízdním pruhu. Pokud je podmínka splněna je opět CarAgent umístěn do buňky v pravém pruhu. Ve druhé fázi je proveden přesun CarAgentů na základě stejného pravidla jako je tomu u pohybu v jednom jízdním pruhu. Aby nedocházelo k omezení rychlosti CarAgentů jedoucích v pravém jízdním pruhu CarAgenty přejíždějících z levého jízdního pruhu, je první fáze nejprve provedena v pravém jízdním pruhu a následně v levém pruhu. V pravém pruhu jsou tak již rezervovány místa plánovaného projetí pomocí metody šíření polí. Tím je dosaženo toho, že CarAgenty v levém pruhu se nevrátí do pravého pruhu pokud je cílové místo označeno polem jiného CarAgentu, ale pokračují v pohybu v levém jízdním pruhu.

Pro řešení pravidel pohybu v rámci obousměrných úseků s  $n$  jízdními pruhy jsou globální pravidla dosti složitá a jejich aplikace na rozsáhlou silniční síť je výpočetně velice náročná. Také návrh takovýchto pravidel, platných pro celulární automat, který odpovídá silničním úsekům s větším počtem pruhů s oboustranným dopravním směrem, je velice náročný. Pro řešení složitějších situací se tak předpokládá využití pravidel na straně logické jednotky implementované v každém CarAgentu.

Zvyšující se složitost vývoje diskrétního modelu společně s komplikacemi při implementaci šíření polí přes distribuované CA a také již existující alternativa iteračních pravidel v podobě logiky pohybu na straně CarAgentu vedla k zamyšlení, zda je nutné vytvářet hybridní model sítě nebo zda není jednodušší využít kontinuálního popisu silniční sítě podél liniových prvků reprezentujících silniční úseky. Hlavním důvodem pro zvolení hybridní reprezentace byl předpoklad jednodušší definice prostorových vztahů v prostoru pravidelné sítě buněk. Druhým důvodem byla možnost použití iteračních pravidel pro realizaci pohybu agentů. Při realizaci sítě složené z distribuované sítě buněk silniční infrastruktury rozložené do CA s různou velikostí se však objevily problémy při řešení provázanosti těchto automatů. Také realizace a rozhodování o pohybu CarAgentů pomocí pravidel CA bylo nahrazeno individuálním rozhodováním logické jednotky jednotlivých CarAgentů. Proto bylo nutné rozhodnout, zda model distribuované sítě buněk je ve výsledku opravdu jednodušší nebo zda by měl být využit na prostorové vztahy složitější kontinuální prostor. Zde je rozbor vlastností diskrétní a kontinuální reprezentace prostoru silniční sítě:

#### **Diskrétní reprezentace prostředí:**



Obrázek 19: Síť buněk typové křižovatky včetně trajektorií průjezdu

- Výhoda
  - Jednodušší definování prostorových vztahů.
- Nevýhody
  - K vytvoření hybridní reprezentace je nutné, kromě objektů silniční sítě, vytvoření i jejich vnitřní reprezentace, kterou tvoří síť buněk. V případě křižovatky je vytvoření sítě buněk dosti problematické, protože je nutné pro metodu šíření polí a simulaci pohybu CarAgentů nadefinovat posloupnosti buněk, definující spojnice mezi vstupními a výstupní jízdními pruhy. Obecná pravidla pro generování těchto posloupností, včetně určení buněk, kde se tyto spojnice kříží, jsou poměrně rozsáhlá. Vyhnutí se definici těchto pravidel je možné “ručním” předdefinováním typových křižovatek, které definují průjezdné trajektorie křižovatkou a také místa, kde se tyto průjezdné cesty kříží. Příklad typové křižovatky je zobrazen na obrázku č. 19.
  - Je nutné řešit překrývání CA, aby bylo umožněno šíření polí (předávání informací o polohách agentů a objektů ve vedlejších dopravních úsecích



nebo křižovatkách).

- Pohyb CarAgentů je omezen na místa buněk (v konkrétním případě po 5 metrech).
- Rychlost agentů je omezena na násobky velikosti buňky za časový krok (v konkrétním případě 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, atd.).
- CarAgent má velikost jedné buňky.
- Dochází k zaokrouhlení délky úseku při generování CA.

Tento zjednodušený model lze zpřesnit jemnějším dělením prostoru (například buňka 1 metr). CarAgent je v tomto případě reprezentován více buňkami. Implementace větších CarAgentů lze realizovat pomocí šíření pole. Větší počet buněk, ale zvyšuje nároky na paměť a šíření pole je výpočetně náročnější.

### **Kontinuální reprezentace prostředí:**

- **Výhody**

- Liniové entity vycházející ze vstupních dat není třeba dále upravovat. Není tedy nutné implementovat vnitřní struktury silničních úseků, vytvářet typové křižovatky ani řešit překrývání CA, což značným způsobem zjednoduší implementaci silniční infrastruktury. Křižovatky lze chápat jako bezrozměrné místo nebo je možná jejich přibližná automatická rekonstrukce na základě průběhů silničních pruhů, jak je blíže popsáno v kapitole 6.4.3.
- Určování polohy podél jízdních pruhů je vyjádřeno s přesností datového modelu vstupních dat (nedochází ke generalizaci míst prostoru jako u diskrétního modelu).
- Lze definovat agenty různé velikosti bez zvýšení výpočetní náročnosti modelu.

- **Nevýhoda**

- Relativně složité prostorové vztahy v obecném dvojrozměrném prostoru.

Při využití kontinuální reprezentace odpadá proces generování pole buněk, reprezentujících silniční entity a nutnost vytvářet předdefinované modely křižovatek. Přesnost určování polohy a definice rychlosti je v kontinuálním modelu vždy vyšší než u diskrétní reprezentace. Náročnost na paměť je rovněž menší. Co se týče výpočetní náročnosti operací, jako určování vzdálenosti a výpočet rychlosti, není u jednotlivých modelů zásadní rozdíl. Rozdíl je pouze v práci s celočíselnými hodnotami u diskrétního modelu a reálnými čísly v kontinuálním modelu. Prováděné



operace jsou pouze sčítání, odčítání popřípadě násobení tedy výpočty v kontinuálním modelu nejsou o mnoho výpočetně náročné. Určování prostorových vztahů v rovinném prostoru silničního úseku je v případě diskrétního modelu jednodušší, neboť buňky tvoří pravidelnou mříž, což zjednodušuje dotazování na polohu okolních objektů CarAgentu. K určení, zda je místo obsazeno či není, je jednodušší zjistit hodnotu obsazenosti buňky, než počítat prostorové vztahy v obecném dvojrozměrném prostoru. Jak však bude dále popsáno, navržená kontinuální reprezentace silničního úseku je omezena na podélnou část jízdních pruhů (jednorozměrný prostor) a v příčném směru na diskrétní reprezentaci. Tento pseudo-dvojrozměrný prostor není pro výpočet prostorových vztahů o mnoho složitější než diskrétní reprezentace.

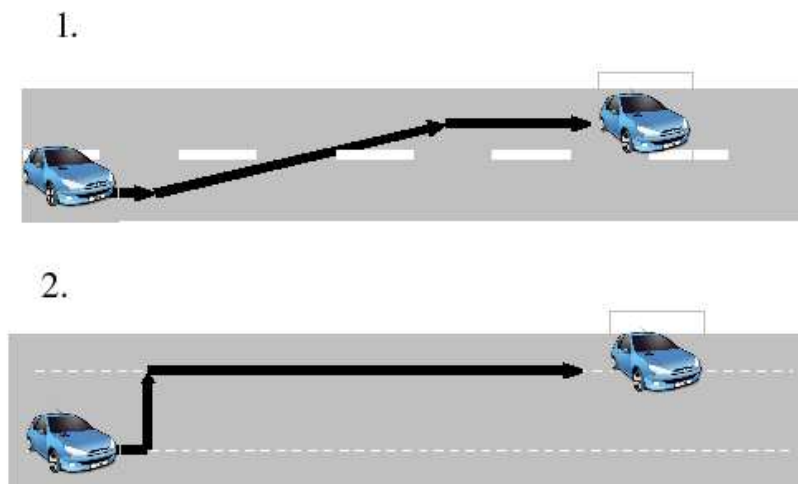
Kromě samotné reprezentace prostoru je také nutné se zamyslet nad prostorovým vnímáním CarAgentů. Účelem šíření polí bylo kromě informování agenta o poloze, rychlosti popřípadě dalších informacích o agentech a objektech, také jejich využití při výpočtu pohybu pomocí iteračních pravidel CA (šíření informací o dopravním značení). V případě samotného informování CarAgentů o poloze, rychlosti a směru je ukládání těchto informací do buněk zbytečně komplikované. Šíření pole pohybujícího se CarAgentu znamená neustálou aktualizaci buněk, přes které se pole šíří. Jednodušší způsob je CarAgentu předávat informaci o poloze jiných agentů nebo objektů přímo tak, jak je určeno v modelu prostředí, popřípadě upraveno do podoby relativních vzdáleností od CarAgentu. Popis vnímání na základě tzv. viditelnosti bude blíže vysvětlen v kapitole 6.6.3. Vnímání okolí prostřednictvím viditelnosti je také bližší prostorovému vnímání skutečného řidiče.

Z uvedeného rozboru je patrné, že výhody kontinuální reprezentace převyšují výhody diskrétní reprezentace. Implementace silniční sítě pomocí kontinuálního prostoru reprezentovaného silničními pruhy je implementačně méně náročná, prostorově přesnější a také vhodnější pro implementaci prostorového vnímání agentů. Výhoda jednodušších prostorových vztahů diskrétního prostoru je oproti pseudo-dvojrozměrnému kontinuálnímu prostoru nepatrná. Z těchto důvodů bylo od implementace hybridního modelu ustoupeno a implementace prostředí simulátoru byla realizována v kontinuálním prostoru, kterým se zabývá následující kapitola.

#### **6.4.2 Kontinuální reprezentace prostoru v rámci silničních úseků**

V kontinuálním prostoru je poloha entit popsána pomocí reálných čísel, tzv. souřadnic. Hodnoty souřadnic udávají vzdálenosti od počátku souřadnicového systému podél jednotlivých os. Počet os je dán rozměrností popisovaného prostoru. V případě zájmového dopravního systému se v reálném světě dopravní prostředky pohybují po ploše silniční infrastruktury. Pokud tedy budeme považovat za prostor, ve kterém se mohou dopravní prostředky pohybovat plochu silnice, je zkoumaný svět dvourozměrný. Data popisující silniční infrastrukturu jsou ovšem složena pouze z bezroz-

měrných a jednorozměrných geoprveků reprezentujících středové osy silničních úseků. Navržený model rozšiřuje tento popis o reprezentaci jízdních pruhů. Jízdní pruhy jsou v rámci silničního úseku od sebe vzdáleny o určitou vzdálenost podél normály k ose komunikace. Tímto způsobem je model sítě rozšířen do pseudo-dvourozměrného prostoru. Takovýto prostor umožňuje kontinuální určování polohy podél osy komunikace, určování polohy podél osy k ní kolmé je omezeno pouze na jízdní pruhy. Z toho tedy plyne, že polohu agentů napříč silničním úsekem lze definovat pouze v diskrétních hodnotách odpovídajících číslům jízdních pruhů. Toto omezení ale není pro simulaci běžného provozu zásadní, neboť dopravní prostředky se běžně vyskytují pouze v rámci jízdního pruhu. V případě provedení změny jízdního pruhu dochází k zjednodušení, neboť CarAgent se nepohybuje ve směru obou os, ale pouze ve směru podélné osy s počáteční skokovou změnou jízdního pruhu tak, jak je zobrazeno na obrázku č. 20.

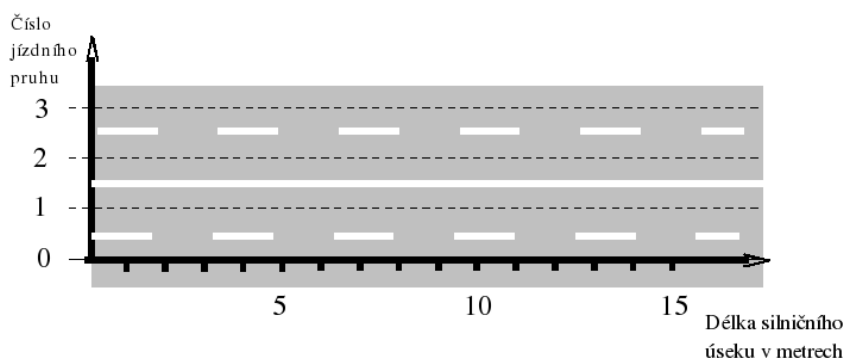


Obrázek 20: Trajektorie vozidla při předjíždění 1) v reálné silniční síti 2) v modelu silniční sítě

Toto omezení se však vzhledem k bezpečnostním vzdálenostem mezi dopravními prostředky, jako jsou osobní nebo nákladní automobily, neprojeví významným způsobem na výsledku simulace.

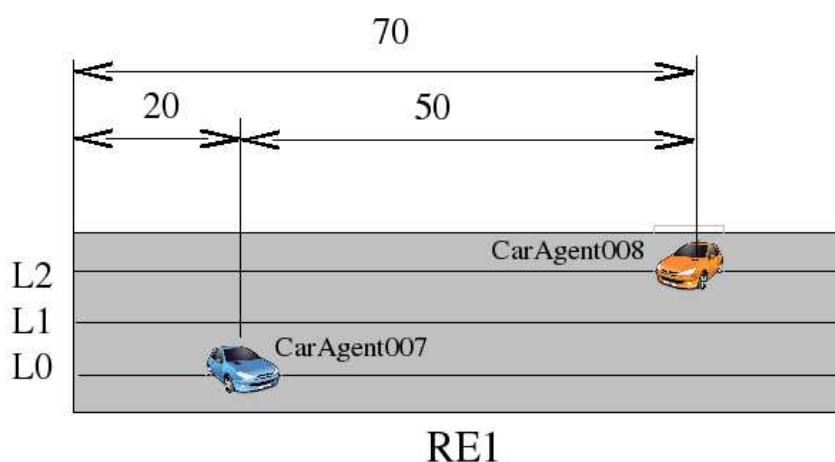
Definice polohy CarAgentu je tak v navrženém prostředí složena ze dvou souřadnic v rámci souřadnicového systému silničního úseku. První souřadnice určuje vzdálenost od počátku souřadnicové soustavy podél osy silničního úseku v reálných číslech a druhá určuje vzdálenost na ose k ní kolmé v celých číslech v rozsahu počtu jízdních pruhů. Platnost souřadnicového systému je pouze lokální v rámci entity RoadElement. Pro absolutní polohu agenta nebo objektu v silniční síti je navíc potřeba uvést číslo RoadElement a číslo entity Road.

Počátek souřadnicové soustavy je definován počátečním bodem nultého silničního pruhu v rámci daného silničního úseku, jak je zobrazeno na obrázku č. 21.



Obrázek 21: Souřadnicový systém v rámci entity RoadElement

Prostorové rozhodování CarAgentů je tímto modelem zjednodušeno tak, že agent vnímá prostor před a za sebou podél jednotlivých jízdních pruhů. K určení, zda silniční pruh je vlevo či vpravo od CarAgentu je využito konvence v číslování jízdních pruhů. Vzdálenosti objektů jsou pro zjednodušení počítány pouze podél osy komunikace, neboť přesun mezi pruhy je skokový (nezabírá žádný čas). Příkladem určení polohy protijedoucího CarAgentu je situace zobrazená na obrázku č. 22. CarAgent007 na pozici RE1,L0,20 vnímá CarAgentu008 RE1,L2,70 vzhledem ke své poloze ve druhém pruhu nalevo ve vzdálenosti 50 metrů. Relativní vnímání okolí je dále popsáno v kapitole 6.6.3.



Obrázek 22: Měření vzdáleností v navrženém prostoru modelu

Pro potřeby prostorového rozhodování v rámci nadefinovaných akcí na silničních úsecích je navržený model prostředí dostatečný. Kromě silničních úseků obsahuje mo-

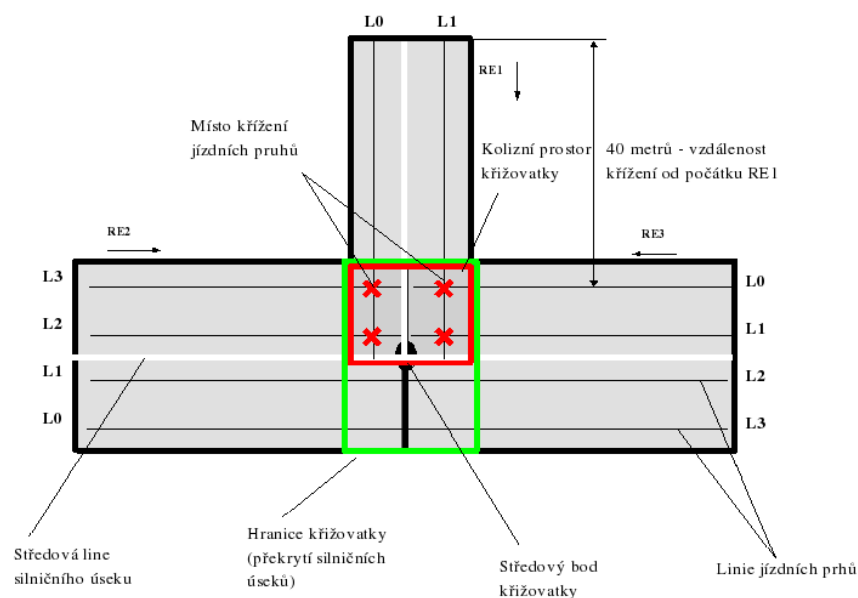
del také křižovatky, které jsou chápány pouze jako bezrozměrné místo, kde začínají a končí silniční úseky. Podle specifikací případové studie jsou CarAgenty navrženy tak, aby dodržovaly dopravní předpisy, tedy agenty neprovedou akci v rozporu s dopravním značením, jako například nedání přednosti na křižovatce. Takovýto předpoklad zjednodušuje simulaci v prostoru křižovatky, neboť v ní nemůže dojít ke kolizím a tedy není potřeba tyto kolize počítat. Vytvořením CarAgentů s možností ignorování dopravních předpisů musí být stávající model rozšířen o detekci kolizí. V rámci silničních úseků je tento problém snadno řešitelný výpočtem prolínání intervalů definujících rozměr CarAgentů podél jízdního pruhu, tedy v rámci jednorozměrného prostoru. V případě míst, kde dochází ke křížení dopravních pruhů (křižovatek), je však potřeba rozšířit model o popis těchto křížení, aby bylo možné rozpoznat, zda došlo ke kolizi. Stávající navržený model neobsahuje informace pro zjištění křížení jízdních pruhů, tedy drah, po kterých se pohybují CarAgenty. Rozšířením modelu o popis těchto míst se zabývá následující kapitola.

#### 6.4.3 Řešení prostorových vztahů v rámci plošného prostoru křižovatky

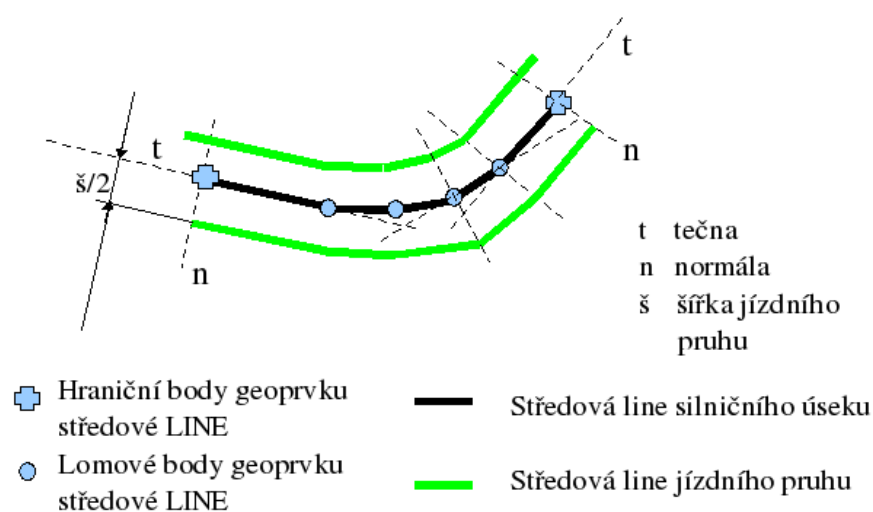
Rozšířením popisu prostoru silničních úseků o jízdní pruhy (pseudo-dvojměrný prostor) dochází v modelu křižovatky k jejich křížení. Obrázek č. 23 zobrazuje prostor křižovatky navrženého modelu prostředí. Vzhledem k tomu, že jízdní pruhy nemají žádnou geometrickou reprezentaci, není přímo možné detekovat kolizi po nich se pohybujících agentů. Řešením je popis místa, kde se jízdní pruhy kříží, v attributech entit Lane. To je možné provést vytvořením geometrické reprezentace jízdních pruhů nad vstupními daty a výpočtem bodu jejich křížení. Bod křížení lze pak zapsat pomocí metody staničení vzdáleností od počátku každé linie do parametrů entity Lane. Díky znalosti místa křížení bude možné opět použít metodu prolínání intervalů podél jízdních pruhů, které reprezentují CarAgenty, podobně jako při výpočtu kolizí v silničním úseku.

Druhým řešením je definice geometrie CarAgentů na základě geometrie jízdních pruhů a zapsáním jejich geometrické reprezentace do entit Lane a do vlastností CarAgentů. Výpočet kolize je v tomto případě založen na výpočtu křížení geometrií CarAgentů, tedy výpočtu, zda tyto geometrie mají společný bod.

Základem obou řešení je nalezení kolizního prostoru z geometrické reprezentace jízdních pruhů. Tuto operaci je nutné provést nad zdrojovými daty, tedy na straně GIS. Vytvoření geometrií jízdních pruhů je možné na základě středové linie silničního úseku. Jestliže je liniový geoprvek středovou osou silničního úseku, je možné na základě znalosti šířky pruhů vytvořit linie, kopírující geometrie osy posunuté o polovinu šířku jízdního pruhu podél její normály. Vzniklé linie reprezentují osu jízdních pruhů a jsou geometrickou reprezentací entity Lane. Způsob vytvoření linií jízdních pruhů ilustruje obrázek č. 24.



Obrázek 23: Schéma křižovatky - prostoru, kde se protínají středové linie jízdních pruhů. Znázorněný kolizní prostor vymezuje plochu ve 2D prostoru, body křížení reprezentují kolizní místa v modelu silniční sítě.



Obrázek 24: Způsob vytvoření liniového prvku středových os jízdních pruhů z geometrie středové line silničního úseku.

Průběhy jízdních pruhů jsou následně uloženy do nové vrstvy pro opětovné využití při generování modelu silniční infrastruktury. V případě prvního navrženého řešení jsou využity popisné informace geoprvků k nastavení atributů entit Lane, v případě

1.RE ID	Lane1_ID	Vzdálenost od počátku 1. RE	2.RE ID	Lane2_ID	Vzdálenost od RE počátku 2. RE
2	2	45	1	0	45
2	3	45	1	0	40
3	0	45	1	1	40
3	1	45	1	1	45

Tabulka 9: Možný zápis bodů křížení. Jeden řádek reprezentuje zápis pro jednu entitu Lane.

druhého řešení jsou do entit Lane uloženy přímo geometrie jízdních pruhů.

První navržený způsob řešení kolizí tedy počítá s uložením poloh křížení do entit jízdních pruhů. Výpočet místa, kde dochází ke křížení jízdních pruhů, je proveden pomocí toplogických funkcí GIS. Poloha místa křížení je pak uložena do popisné složky geoprvcu, z níž se při generování modelu zapíše do entity Lane. Příklad popisu místa křížení, který vychází z obrázku č. 23 je popsán tabulkou č. 9. Výpočet nad geometrickou složkou je proveden pouze jednou při generování popisné složky geoprvců na základě původních dat. Při změně původních dat (jejich aktualizaci) je nutné pomocnou vrstvu vytvořit znovu.

Definovaná místa křížení umožní CarAgentu vnímat křížení jízdních pruhů a reagovat tak na ostatní CarAgenty, které se k tomuto místu blíží, aby nedošlo ke kolizi. Vytvoření geometrie jízdních pruhů a následný výpočet jejich křížení je nutné provést nad zdrojovými daty na straně GIS, protože entity modelu silniční sítě již neobsahují informaci o své geometrii. Výhodou tohoto řešení je určení polohy křížení v prostředí MAS bez znalosti geometrie a nutnosti výpočtu s využitím geometrických funkcí. Druhé navržené řešení vychází ze znalosti geometrické reprezentace jízdních pruhů (uloženo v entitě Lane) na straně modelu prostředí a dynamického generování geometrií CarAgentů na základě jejich umístění a velikosti. V tomto řešení není třeba předpočítat místa křížení jízdních pruhů, ale agenty musí mít implementovány metody pro práci s geometriemi geoprvců a výpočet možného křížení je dynamicky počítán v průběhu simulace.

Popsané způsoby řešení kolizí CarAgentů v místech křížení jízdních pruhů v roviněm prostoru křižovatek jsou pouze návrhem bez provedené implementace pro případné rozšíření možností simulace. Využití jednoho z řešení závisí na jeho implementační a výpočetní složitosti.

## 6.5 Výběr a popis použitých silničních dat

Data o silniční síti jsou standardně uložena ve vektorovém formátu. Prvky sítě jsou rozděleny podle geometrického typu na soubory obsahující liniové prvky silničních úseků a bodové prvky křižovatek. Popisná složka obsahuje informace o typu a do-

pravních omezeních v rámci geoprůvku. Rozsah sledovaných parametrů silniční infrastruktury je však odlišný mezi jednotlivými datovými sadami. Mezi základní atributy patří:

Silniční úseky:

- označení, jméno ulice, číslo silnice
- délka
- kvalita, typ komunikace
- dopravní směry
- povolená rychlost
- počet jízdních pruhů

Křižovatky:

- označení
- seznam napojených silničních úseků
- typ řízení dopravy v křižovatce

Pro účely navigace obsahuje popisná složka dat také identifikátory navazujících prvků sítě nebo zvláštní databázové tabulky, sloužící k provázání prvků sítě do grafu pro potřeby navigace a plánování cesty.

Výběr vstupních dat pro případovou studii musí splňovat následující požadavky, vycházející z navrženého modelu:

- Data musí obsahovat informace pro provázání silničních úseků a křižovatek do grafu.
- Atributová složka silničních úseků musí obsahovat počty jízdních pruhů pro jednotlivé směry.
- Datová sada musí mít informace o dopravním značení typu hlavní silnice, vedlejší silnice a omezení rychlosti.

#### **6.5.1 Data porubského areálu VŠB-TU Ostrava**

Pro ověření funkčnosti simulátoru byla před získáním profesionálních silničních dat vytvořena datová sada uzpůsobena návrhu modelu. Základem byla data ze studentských měření silniční sítě (silniční úseky, křižovatky) v areálu VŠB-TU Ostrava, upravená a doplněná podle potřeb navrženého modelu. Data jsou uložena ve formátu

ESRI Shapefile ve vrstvě silničních úseků (vsb\_road) a vrstvě křížení (vsb\_junction). Datový model obou vrstev je uvedený v příloze A. Kromě dat silniční sítě jsou pro potřeby vizualizace zajištěna data digitálního modelu terénu a 3D modely budov areálu univerzity.

### 6.5.2 Data silniční databanky Ostrava

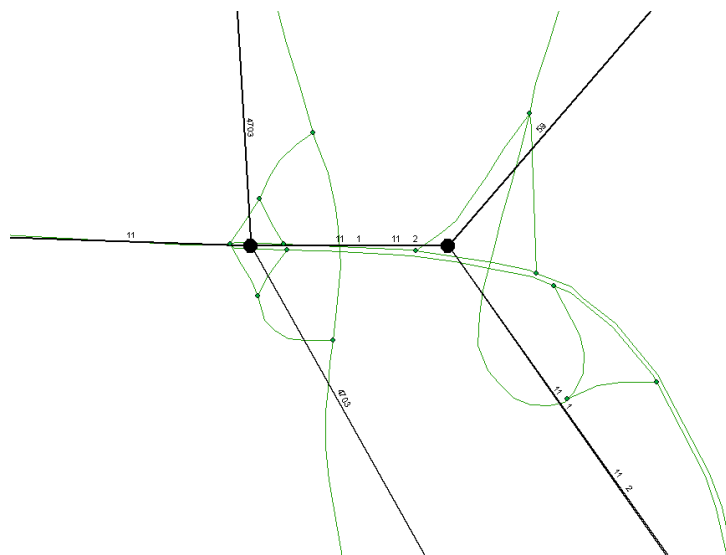
Aby bylo možné simulovat provoz na rozsáhlejší území a také aby bylo možné využít simulátor pro praktické účely, byla provedena analýza dostupných dat pro oblast České republiky. Z možných zdrojů dat připadala k úvahu data používaná pro navigační aplikace od firem CEDA (Tele Atlas), Navteq a dále data Ředitelství silnic a dálnic. Tyto datové zdroje obsahují jak data o průběhu komunikace, tak i data o dopravních omezeních a dopravním značení. K dispozici byla získána část datové sady MutliNet od firmy CEDA pro část pražské silniční sítě. Tato data ovšem nebyla kompletní a popisné informace nebyly z velké části vyplněny. Chyběly například informace o počtu jízdních pruhů, což prakticky znemožnilo použití této datové sady. Dalším problémem byla nekompletní dokumentace datového modelu, což dále ztěžovalo orientaci v datech. Z důvodů nedostatků informací a nekompletnosti datové sady nebylo těchto dat pro potřeby simulace využito. Po navázání spolupráce s oddělením Silniční databanky Ostrava Ředitelství silnic a dálnic (ŘSD) byla získána kompletní pasportizační data pro území Ostrava-město, včetně podrobné dokumentace datového modelu. Z důvodu dobře popsaného datového modelu a velkého rozsahu sledovaných údajů o silniční infrastruktuře bylo těchto dat využito při implementaci modelu silniční sítě. Silniční databanka Ostrava disponuje zmíněnými daty pro celou Českou Republiku, což do budoucna umožňuje rozšíření simulace až na celé území ČR. Aktualizace datové sady probíhá v intervalu 6 měsíců. Data silniční databanky Ostrava tvoří ucelený přehled údajů o dálnicích a silnicích třídy I, II a III ČR, jež spadají pod správu ŘSD. Data jsou uložena ve formátu ESRI ShapeFile a samostatných relačních databázových tabulkách formátu DBF. Geometrický popis silniční sítě je zachycen jak zjednodušenými geoprvky, které odpovídají druhé úrovni datového modelu GDF, tak základními geoprvky první úrovně (viz obrázek č. 25). Pro každou úroveň existují dvě tématické vrstvy, vrstva křižovatek a vrstva dopravních úseků. Pro generování modelu bylo využito popisných dat obou úrovní, protože každá úroveň obsahuje jiné informace o silničních úsecích a křižovatkách potřebné k jeho vytvoření.

Konkrétně se jedná o následující datové vrstvy [54]:

Vrstva **guseky** (odpovídá druhé úrovni popisu formátu GDF).

- délka úseku DELKA\_US
- dopravní směry (jednosměrné, obousměrné) DOPR\_SMERY





Obrázek 25: Geometrický popis silniční sítě z dat SDO. Černou barvou jsou reprezentovány prvky druhé úrovně, zelenou prvky první úrovně. Převzato z [54].

- třída komunikace

Vrstva **guzly** (odpovídá druhé úrovni popisu formátu GDF).

Z této vrstvy bylo využito pouze označení uzlů pro vytvoření koncových uzlů grafu.

- číslo uzlu CIESLO\_uzlu

Vrstva **gpasport** (odpovídá první úrovni popisu formátu GDF).

- číslo silnice SILNICE
- číslo úseku CIS\_USEKU
- délka úseku (součet délek jeho sekcí)
- šířka silničního úseku SIR\_JPASU
- přídatné pruhy PRID\_PR\_L1, PRID\_PR\_P1, PRID\_PR\_L2, PRID\_PR\_P2
- celkový počet jízdních pruhů na úseku POC\_JPRUHU
- počet jízdních pruhů na levé straně úseku POC\_JPRUHL
- omezení rychlosti vlevo, vpravo - OMEZ\_RYCHP, OMEZ\_RYCHL

Atributy POC\_JPRUHU a POC\_JPRUHL jsou využity k vytvoření jízdních pruhů (entit Lane), pro definici návaznosti mezi jízdními pruhy slouží atributy PRID\_PR\_L1, PRID\_PR\_P1. Tyto atributy určují polohu přídavných pruhů silničního úseku, díky nimž je možné definovat, které silniční pruhy mají být provázány a jaký typ přechodu mezi nimi existuje.

Vrstva **gkrizov** (odpovídá první úrovni popisu formátu GDF).

SDO popisuje křižovatky pomocí množiny bodových geoprvků se stejnou polohou, body se vztahují k jednotlivým úsekům vstupujícím do křižovatky. Každý bodový geoprvek má uloženy informace ke konkrétnímu napojení. Díky tomu je možné v popisné složce sledovat údaje, jako je dopravní význam napojení, směry dopravy, počty jízdních pruhů na vjezdu a výjezdu, úhel napojení a mnoho dalších.

- id uzlu
- typ křižovatky (úrovňová, mimoúrovňová) TYP\_KRIZ
- identifikátor napojení NAV\_UZ\_ORI
- způsob řízení dopravy ZPUS\_RIZE
- uzel navazující na napojení NAV\_UZ\_ORI
- vzdálenost hranice křižovatky VZD\_HRA\_KR
- dopravní význam napojení DOPR\_VYZN
- směr v jízdním pruhu (1-6) - tento atribut není vyplněn a nelze tedy použít

Kromě uvedených datových vrstev popisujících neproměnné parametry silniční sítě obsahuje SDO tyto data:

- Podloží a konstrukční vrstvy vozovek
- Ekologické údaje
- Geometrické vedení trasy
- Dálniční specifikace
- Proměnné parametry
- Registr stavební činnosti
- Dopraví inženýrství

Analýza datového modelu dat silniční databanky sloužila k navržení konverzního modulu pro převod těchto dat z vektorového modelu do objektového modelu silniční sítě. K vytvoření objektově-orientované struktury bylo potřeba provést zásadní změny v datovém modelu vstupních dat. Datový model silniční databanky definuje entitu Road jako posloupnost liniových prvků se shodným označením čísla úseku, nazývaní se sekce. K vytvoření entity první úrovně odpovídající entitě RoadElement je nutné sloučit po sobě jdoucí sekce, které mají v rámci entity Road stejný počet jízdních pruhů. Tato úprava byla celkem zásadní a vyžádala si vznik nových geoprvků odpovídajících entitám RoadElement a Junction. Popis této úpravy dat silniční databanky Ostrava je popsán kapitole 6.6.2.

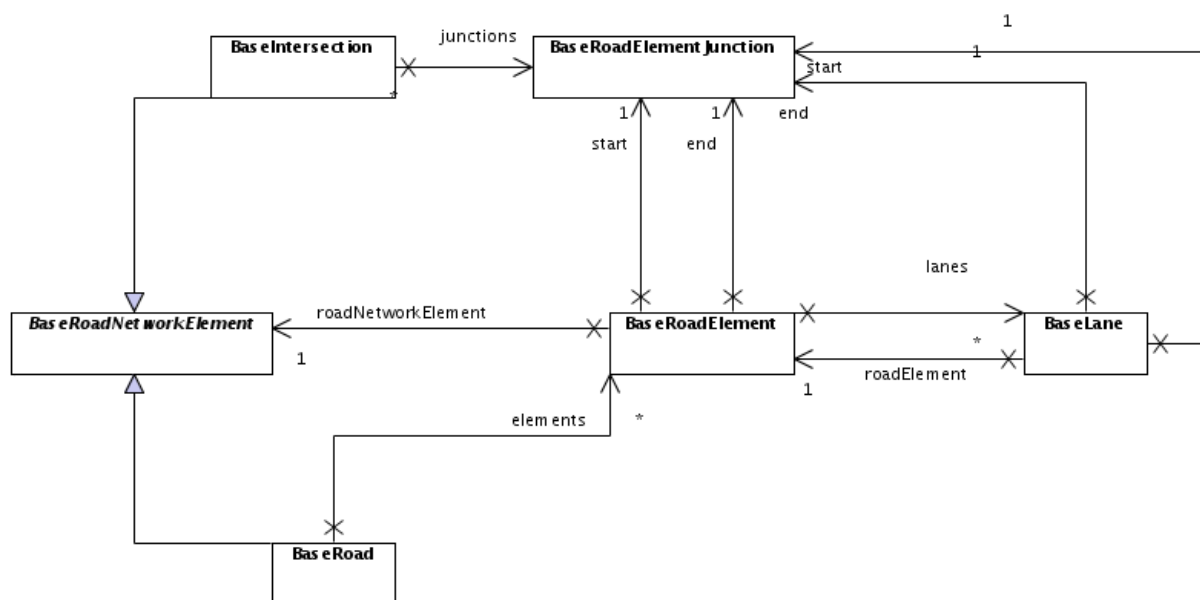
## 6.6 Implementace

Na základě analýzy a návrhu byla provedena implementace objektů silniční infrastruktury a zapojení vytvořeného modelu do simulátoru. Architektura simulátoru je postavena na frameworku JADE a vychází z návrhu prostorových MAS, popsaného v dizertační práci Pavla Děrgela [12]. Implementace a integrace prostředí společně s implementací propojení agentového systému s logickou jednotkou byla provedena společně s Pavlem Děrgelem. Úprava dat a implementace konverzního modulu pro data silniční databanky Ostrava byla provedena čistě autorem práce.

### 6.6.1 Implementace objektového modelu sítě do architektury simulátoru

Vektorový datový model, v němž jsou vstupní data uložena, není vhodnou strukturou pro reprezentaci prostoru pro MAS. Důvodem je tématické rozdělení zachycených prostorových informací do tzv. vrstev. Každá vrstva obsahuje množinu geoprvků shodného geometrického typu popisující spolu s atributovými daty určité prostorové entity. V případě silniční sítě tak existuje vrstva křižovatek (napojení) a vrstva silničních úseků. Identifikace jednotlivých prvků a jejich vazby jsou řešeny na úrovni popisných informací. Pro implementaci prostředí pro MAS je vhodnější zapouzdřit informace o entitách sítě do vlastností objektů a jejich vztahy popsat relacemi mezi objekty (tzv. asociacemi). Implementace prostředí pak lze snadno provést pomocí objektově orientovaného programování. Navržené entity prostředí slouží jako předpis pro definici tříd objektů. Zjednodušený digram tříd vycházející z entit silniční sítě je zobrazen na obrázku č. 26.

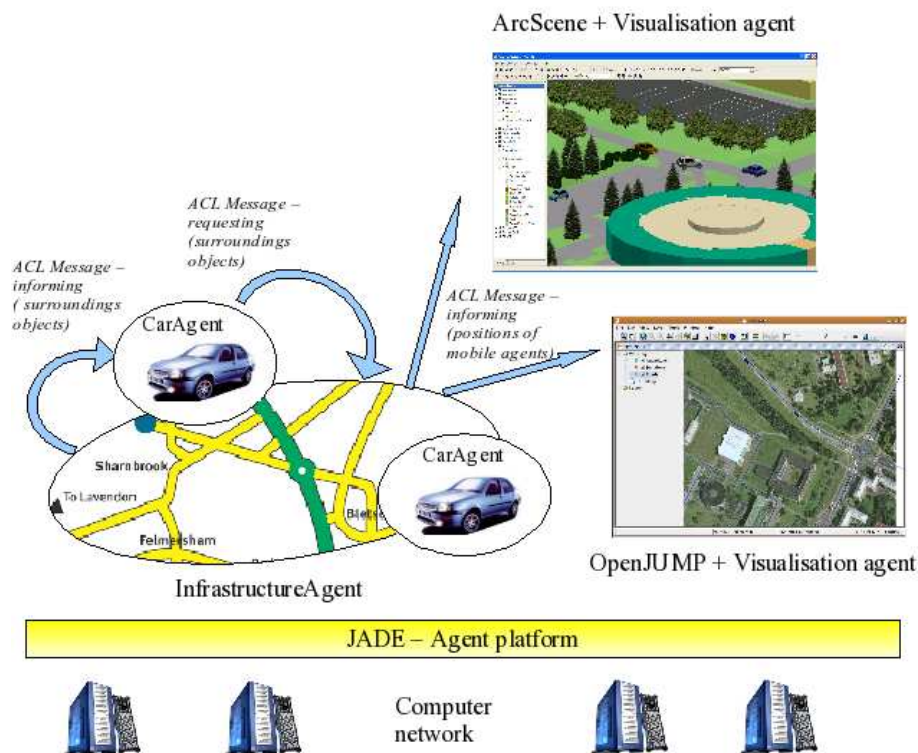
Základní třídou infrastruktury je třída BaseRoadNetworkElement, ze které vycházejí dvě základní třídy silniční infrastruktury, BaseRoad a BaseIntersection. Tyto třídy odpovídají entitám druhé úrovně navrženého modelu a obsahují kolekci jim příslušných objektů tříd BaseRoadElement a BaseJunctionElement. Z diagramu jsou dále patrné vztahy mezi těmito třídami úrovně 1, třída BaseRoadElement má asociaci na počáteční a koncovou instanci třídy BaseJunctionElement. Třída BaseLane



Obrázek 26: Diagram tříd modelu silniční infrastruktury

má podobně jako BaseRoadElement asociace na dvě instance této třídy, sloužící k definici návaznosti jízdních pruhů mezi silničními úseky a také asociaci na instanci třídy BaseRoadElement definující její příslušnost k objektu daného silničního úseku. Instance zmíněných tříd jsou vytvořeny z jednotlivých vrstev vstupních dat. Spojení mezi instancemi tříd jsou vytvořeny na základě popisné složky dat. Instance tříd jsou následně využity pro vytvoření grafové struktury s využitím open-source projektu JGraphT. Vytvořená grafová struktura pak slouží k inicializaci objektu třídy BaseWorld, který nad touto strukturou implementuje metody pro vyhledávání cesty v silniční síti, adresaci a pohyb CarAgentů v silniční síti. Instance třídy BaseWorld tak představuje objektově orientovaný model určité části silniční infrastruktury. Za účelem integrace objektového modelu infrastruktury do podoby prostředí MAS je vytvořená instance třídy BaseWorld uložena do InfrastructureAgentu. Zprostředkování prostředí definovaného tímto agentem ostatním agentům je popsáno v kapitole 6.3.3. Komunikace mezi agentem infrastruktury a CarAgenty je implementována s využitím agentové platformy frameworku JADE. Celková architektura MAS vytvořeného simulátoru je zobrazena na obrázku č. 27. Proces vytvoření prostředí MAS

ze vstupních dat je zobrazen pomocí diagramu činností na obrázku č. 28.



Obrázek 27: Architektura silničního simulátoru postaveného na MAS [21].

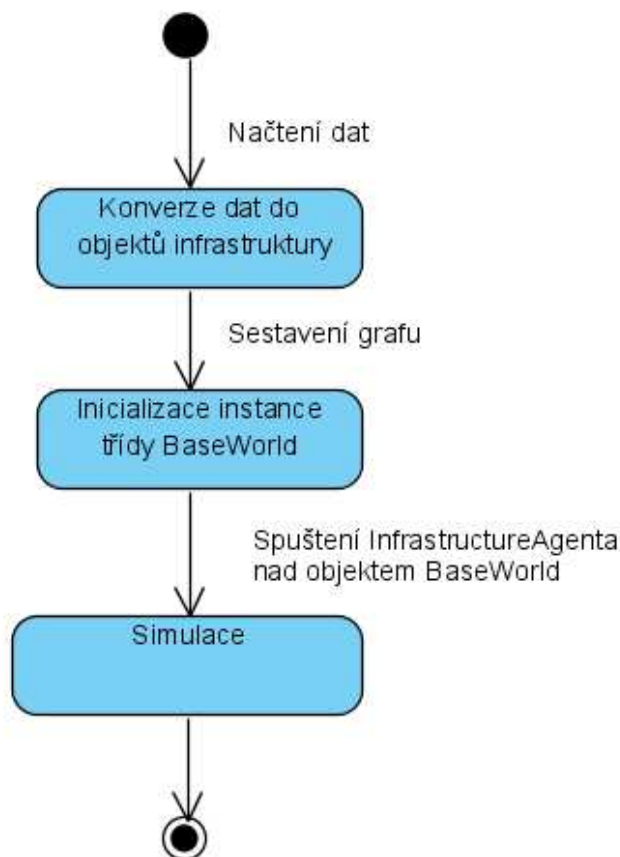
Mezi hlavní úkoly InfrastructureAgenta patří:

- registrace CarAgentů k silniční infrastruktuře,
- generování časových kroků simulace,
- poskytování informací o objektech a agentech na silniční infrastruktuře CarAgentům a vizualizačním agentům (funkce vizualizačních bude dále vysvětlena)

Komunikace mezi agenty je založena na posílání ACL zpráv na základě standardu FIPA[45]. Jak již bylo napsáno v úvodu této kapitoly, je pro vytvoření objektů modelu zapotřebí konverze dat z vektorového datového modelu. Popis konverze je uveden v následující kapitole.

### 6.6.2 Implementace konverzního modulu pro načtení silničních dat

Implementace modulu pro konverzi dat se skládá ze dvou částí. První část implementuje metody pro načtení dat z datového formátu a druhá část implementuje metody

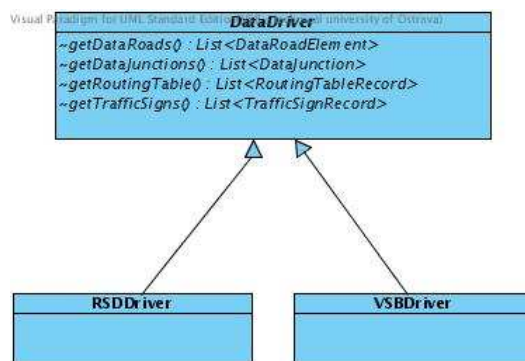


Obrázek 28: Diagram činností při vzniku InfrastructureAgentu tvořícího prostředí silniční infrastruktury na základě silničních dat.

pro převod dat do navržených tříd objektů modelu. Převedení dat je závislé na datovém modelu zdrojových dat a proto je nutné pro každou používanou zdrojovou datovou sadu implementovat speciální třídu. Aby byly odděleny metody pro práci s datovými formáty od konkrétních metod pro převod dat, byla vytvořena abstraktní třída *DataDriver*. Tato třída využívá knihoven projektu *PostGIS* pro načtení dat z *Postgre/PostGIS* a knihoven projektu *OpenJUMP* pro čtení a zápis prostorových dat ve formátu *ESRI Shapefile* a také dat ve formátu *DBF*. *DataDriver* je podle počtu používaných datových sad rozšířen o daný počet specializované třídy pro jejich konverzi (viz obrázek č. 29). Implementovány byly třídy *VSBDriver* pro testovací data areálu VŠB-TU Ostrava a *RSDDriver* pro data ze SDO.

Testovací data jsou uzpůsobena návrhu datové struktury modelu a není tedy třeba je zvláštním způsobem upravovat. V případě dat Silniční databanky Ostrava bylo nutné provést následující úpravy:

1. sjednocení liniových prvků vrstvy **gpassport** reprezentujících sekce silničních



Obrázek 29: Diagram tříd pro import dat z GIS

úseků podle atributu počtu jízdních pruhů.

2. vytvoření nových bodových prvků (Junction), tvořících spojnice nově vytvořených liniových prvků ze sekcí silničních úseků.
3. přejmenování původních vazebních atributů (identifikátorů) liniových geoprvků vrstvy gpassport.

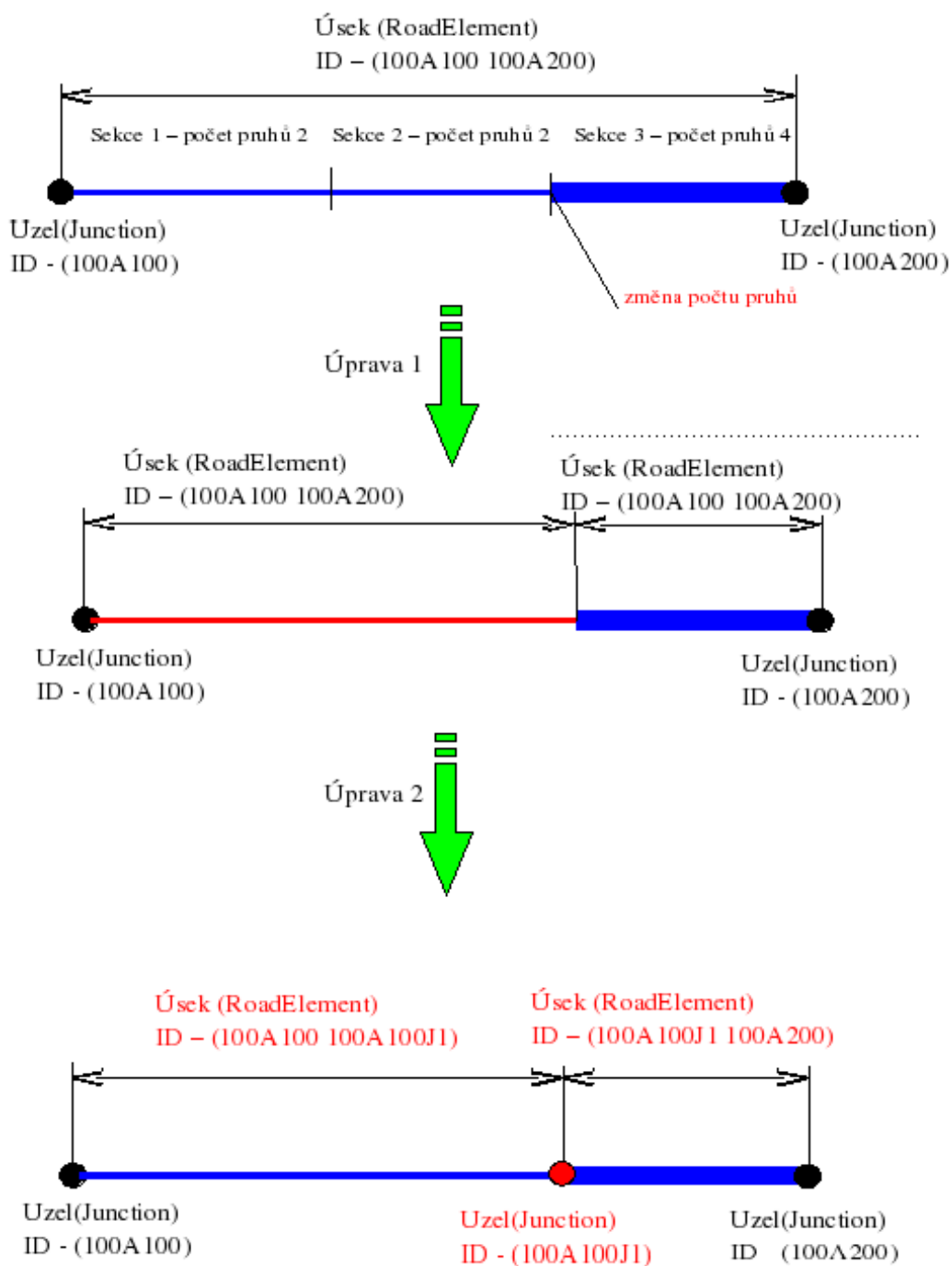
Implementace sjednocení liniových prvků vrstvy gpassport byla provedena podle atributu CIS\_USEKU a POC\_PRUHU. Sjednocení bylo realizováno pomocí metody *union* třídy *com.vividsolutions.jts.geom.Geometry*.

Aby bylo možné vytvořit grafovou strukturu nad silničními daty SDO, jsou bodové a liniové prvky provázány pomocí jejich identifikátorů. Atribut CIS\_USEKU slouží pro uložení informace o krajních bodových geoprvcích (vrstva gkrizov) pro geoprvky z vrstvy gpassport. Číslo úseku je složeno z identifikátorů krajních bodů oddělených mezerou jako oddělovačem. Pořadí identifikátoru krajních bodů rovněž definuje směr dopravního úseku, ke kterému se vztahují jeho dopravní směry. Příklad hodnoty atributu CIS\_USEKU je uveden v příkladě 1.

**Příklad 1** Ukázka propojení prvků silniční sítě pomocí identifikátorů

Junction ID1 - "100A100" Junction ID2 - "100A200"  
 RoadElement ID - "100A100 100A200"

Z důvodu vzniku nových liniových prvků (RoadElement) sjednocením původních sekcí a doplněním chybějících bodových geoprvků reprezentujících entitu Junction bylo nutné provést přejmenování vazebních identifikátorů tak, aby byly zachovány vazby umožňující vytvoření grafové struktury. Identifikátory liniových prvků byly aktualizovány podle identifikátorů krajních bodů. Postup úprav je zachycen na obrázku č. 30. Využité programové prostředky v procesu konverze dat jsou zobrazeny na obrázku č. 31.

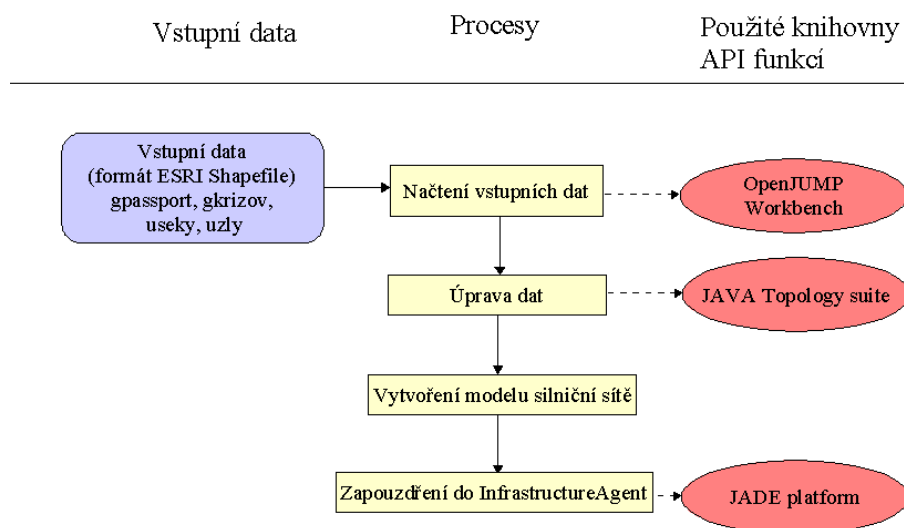


Obrázek 30: Ukázka úprav dat Silniční databanky Ostrava

### 6.6.3 Implementace vnímání prostředí CarAgenty

Každý CarAgent simulující vozidlo má k dispozici vlastní logickou jednotku s bází znalostí provádějící rozhodování o jeho pohybu na základě vstupních informací o aktuální dopravní situaci v okolí agenta. Logická pravidla použitá pro řízení CarAgenty

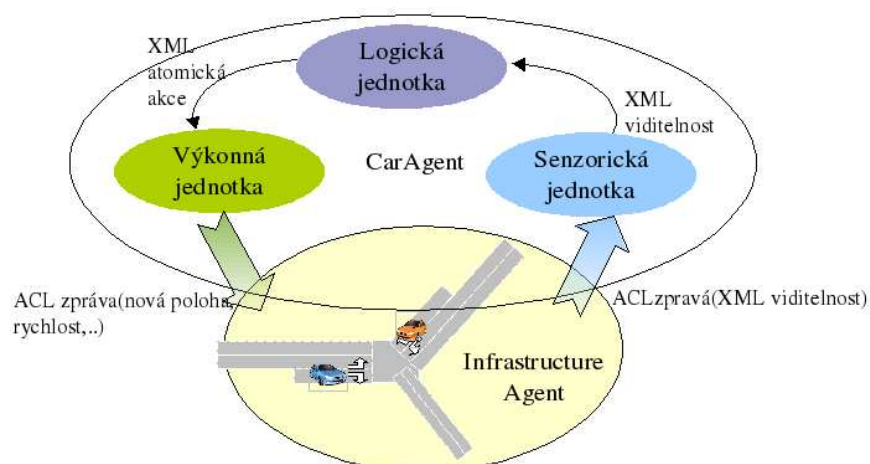




Obrázek 31: Proces konverze dat SDO

jsou navržena tak, aby napodobovala myšlení skutečného řidiče. Reálný řidič se při řízení vozidla rozhoduje na základě informací, které vnímá převážně zrakem. Kromě specifických signálů, které vnímá sluchem, jako je trubení nebo siréna záchranné nebo bezpečnostní složky, jsou všechny informace potřebné pro jeho rozhodování v dopravním systému založeny na jeho vidění. Zprostředkování vidění agentů podobně jako je tomu u skutečného řidiče je základním předpokladem pro napodobení procesu rozhodování skutečných řidičů. Výsledkem rozhodovacího procesu jsou povely k provedení tzv. elementárních akcí typu změň pruh, zrychli či zpomal. Tyto povely z logické jednotky spouští odpovídající chování agenta realizující zamýšlenou akci. Vnitřní struktura CarAgentu je složena ze tří částí: senzorické jednotky, logické jednotky a výkonné jednotky. Výměna informací mezi těmito jednotkami je specifikována na základě rozhraní definovaného pomocí pevné struktury s předem definovanými pojmy. Schéma vnitřní jednotky agenta je zobrazeno na obrázku č. 32.

Jak již bylo zmíněno, pro napodobení rozhodování skutečného řidiče, je potřeba CarAgentu poskytnout prostorové informace podobně jako je vnímá člověk. Struktura modelu prostředí implementovaná grafovou strukturou obsahující objekty silničních entit je pro logiku CarAgentu těžko zpracovatelná. Aby nemusely být prováděny složité výpočty na logické jednotce, je prostředí vnímané senzory CarAgentu upraveno tak, že všechny vzdálenosti v rámci silniční infrastruktury jsou vztaženy k poloze CarAgentu. Tedy poloha objektů a ostatních CarAgentů není definována absolutně referencí k jednotlivým entitám silniční sítě, ale relativně k poloze agenta. Logická jednotka se tedy přímo rozhoduje na základě vzdáleností objektů a agentů, které jsou v dosahu viditelnosti CarAgentu. Výpočet této tzv. viditelnosti probíhá na straně InfrastructureAgentu. Výsledná podoba vidění je uložena do XML dokumentu



Obrázek 32: Vnitřní dělení CarAgentu s naznačenou komunikací vnitřních jednotek

a odeslána ve formě ACL zprávy CarAgentu. Senzorická jednotka (přijímá zprávy typu vidění) přijme tuto zprávu a její obsah následně předá do logické jednotky. Ukázka popisu vidění Car agenta je uvedena na příkladu č. 2.

Vzdálenost, do jaké CarAgent získává informace o svém okolí, je omezena rozsahem viditelnosti. CarAgent tak nemá přístup k polohám všech CarAgentů v celé silniční síti, ale pouze těch, kteří jsou v dosahu jeho viditelnosti. Prostorový MAS tak pomocí prostorových omezení vymezuje možnosti agentů. Schopnosti a omezení agentů však vyplývají z požadavků na model konkrétního systému. V případě popisované dopravní simulace mají CarAgenty pouze schopnosti běžného řidiče dopravního prostředku. Model však může být rozšířen například o schopnost agentů sledovat dopravní prostředky i mimo svou viditelnost. Simulace pomocí takto vybavených agentů pak může například sloužit k zjištění, jakým způsobem by ovlivnily plynulost a bezpečnost dopravy moderní technologie, umožňující skutečným vozidlům sledovat pohyb ostatních účastníků, které jsou i mimo zorné pole řidiče.

Implementace XML dokumentu vidění byla provedena pomocí knihoven open-source projektu jdom.org. Důvodem využití jazyka XML bylo využití externí aplikace realizující logickou jednotku. Implementace rozhodovací jednotky byla provedena v logickém jazyce Prolog a jazyce TIL Script, který je formalizovanou podobou expresivního logického systému TIL (Transparentní intensionální logiky)[50]<sup>1</sup>. Výhodou implementace tohoto rozhraní formou XML je platformní nezávislost jednotlivých jednotek agenta. Na druhou stranu je však toto řešení dosti výpočetně náročné. V případě využití simulace pro větší počet agentů (stovky agentů) je nutná optimalizace komunikace mezi jednotkami CarAgentu a mezi agenty MAS.

<sup>1</sup>Realizace rozhodovací jednotky není prací autora. Autor se pouze podílel na návrhu a implementaci viditelnosti CarAgentů.

## Příklad 2 Ukázka XML dokumentu vidění agentů

```
<infrastructure>
  <intersection id="4" distance="7.799988">
    <road ref="0" azimuth="270" />
    <road ref="3" azimuth="180" />
    <road ref="1" azimuth="90" />
    <road id="0" start="4" end="5">
      <laneSet start="7.799988" end="115.742" id="0">
        <lane index="0" direction="forward" />
        <lane index="1" direction="backward">
          <object type="sign" name="give_way" value=""
            distance="40.74" />
        </lane>
      </laneSet>
    </road>
    <road id="3" start="4" end="8">
      <laneSet start="7.799988" end="123.8" id="0">
        <lane index="0" direction="forward" />
        <lane index="1" direction="backward">
          <agent id="br3@MainMap" distance="78.09">
            <state speed="56" flash="right" direction="backward"/>
          </agent>
          <object type="sign" name="give_way" value=""
            distance="41.799" />
        </lane>
      </laneSet>
    </road>
    <road id="1" start="4" end="6">
      <laneSet start="7.799988" end="111.8792" id="0">
        <lane index="0" direction="forward" />
        <lane index="1" direction="backward">
          <object type="sign" name="major_road" value=""
            distance="40.87923" />
        </lane>
      </laneSet>
    </road>
  </intersection>
</infrastructure>
```

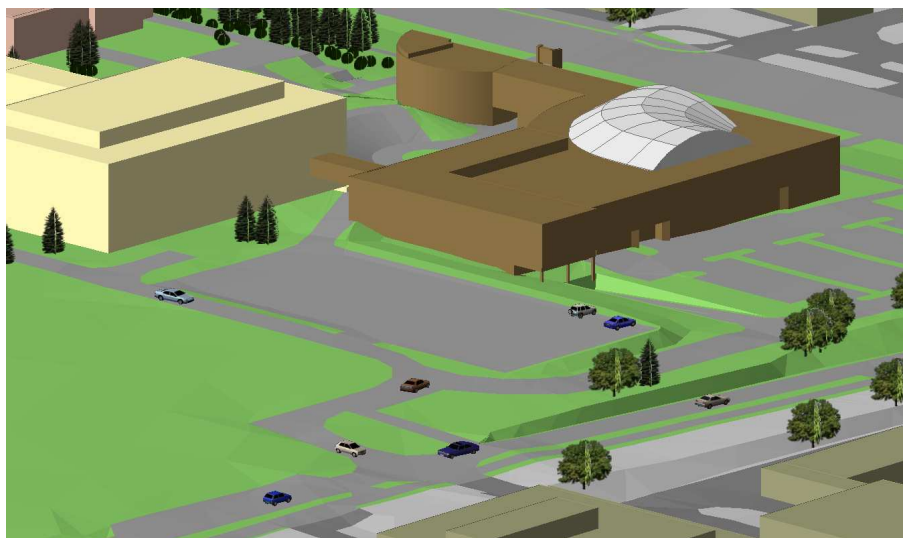
### 6.6.4 Implementace nových vizualizačních možností simulátoru

Kromě popsaných agentů typu CarAgent a InfrastructureAgent obsahuje architektura simulátoru (viz obrázek č. 27) také agenty zajišťující zobrazení průběhu simulace. Vztahy mezi geoprvky reprezentující vozidla a CarAgenty jsou založeny na základě identity. Bodové geoprvky reprezentující CarAgenty jsou uloženy do nové (temporální) vrstvy zobrazené nad silniční sítí. Z důvodů omezených možností zachy-

cení dynamických jevů v GIS je aktualizace polohy skoková, založená na pravidelné aktualizaci této bodové vrstvy. Poloha geoprvcu je počítána na základě vzdálenosti podél geoprvcu silničního úseku na kterém se agent nalézá a indexu silničního pruhu. Poloha je tedy nejprve vypočtena pomocí metody určující bod na linii silničního úseku, následuje vypočtení normály k tomuto bodu a následné upravení polohy geoprvcu v daném směru o vzdálenost vycházející ze vzdálenosti silničního pruhu od středu vozovky. Výhodou využití GIS pro vizualizaci simulace jsou již implementované sofistikované metody pro práci s prostorovými daty a uživatelské nástroje pro prohlížení výsledného mapového výstupu. Další výhodou je možnost připojení podkladových dat vztahujících se k prostoru silniční sítě. Pro dokreslení realistického prostředí simulace je tak například možné zobrazení okolní zástavby podél silniční sítě nebo zobrazení podkladového ortofoto snímku.

Využití GIS aplikací pro vizualizaci simulace je podmíněno jejich podporou tzv. API (Application Programming Interface) funkcí umožňující její rozšíření na programátorské úrovni. V dnešní době je toto rozhraní standardně nabízeno kromě open-source již také i komerčními aplikacemi.

Autor práce, se mimo jiné, podílel i na rozšíření stávajících možností zobrazení o 3D vizualizaci. Kromě již realizovaného VizualizationAgentu pro open-source aplikaci OpenJUMP, byl implementován VizualizationAgent na platformě ESRI ArcGIS pro aplikace ArcMap a ArcScene. Aplikace ArcScene zobrazuje prostorová data v trojrozměrném prostoru a je tak například možné využít digitálního modelu terénu a trojrozměrných modelů budov pro realističtější podobu výstupu simulace, jak je zobrazeno na obrázku č. 33.



Obrázek 33: 3D vizualizace průběhu simulace v aplikaci ESRI ArcScene [17].

## 7 Aplikace simulačního prostředí dopravního systému

Na silnicích celého světa jsou každodenně zraněny tisíce lidí a další stovky lidí přijdou o život. Proto je v poslední době věnována mnohem větší pozornost rozvoji nových technologií v oblasti dopravní telematiky, tzv. inteligentních dopravních systémů (ITS), které mohou pomoci při zvyšování úrovně bezpečnosti a výkonnosti silniční dopravy a současně nabízí jejím účastníkům větší pohodlí a vyšší stupeň vybavenosti. Očekává se, že vývoj a zavádění těchto inovačních technologií do oblastí konstruování automobilů a projektování bezpečnější silniční infrastruktury bude významným příspěvkem k dosažení cíle definovaném v Bílé knize Evropské komise o dopravě, kterým je 50% snížení počtu obětí dopravních nehod na evropských silnicích v roce 2010 [53]. Vytvořený model dopravního systému spolu s poznatky při jeho vývoji je možné aplikovat pro mnoho oblastí dnešních ITS. Příkladem možných aplikací plynoucích z doporučení přijaté Evropskou Komisí na základě iniciativy eSafety pro vývoj, implementaci a používání inteligentních integrovaných systémů bezpečnosti silničního provozu jsou [55] :

- analýza příčin nehod - popsáný model vytvořený na základě skutečné silniční infrastruktury umožňuje simulovat chování dopravy na úrovni individuálního chování řidičů a pomoci tak při analýze příčin dopravních nehod.
- vývoj kooperativních systémů, vývoj komunikace vozidlo - vozidlo (V2V communication) za účelem varování před srážkou nebo kolizí v křižovatce a komunikace vozidlo - infrastruktura (V2I communication) za účelem adaptace rychlosti s ohledem na počasí, překážky na cestě a dopravní zácpy - paradigma MAS tvořícího základ vytvořeného simulátoru je založeno na kooperaci různých agentů dopravního systému. Jeho využití pro navrhované kooperativní systémy je zřejmé. Komunikace mezi agenty simulující dopravní prostředky, popřípadě mezi agenty dopravního prostředku a infrastrukturou, byla ověřena na příkladu dopravního simulátoru. Využitím agentového přístupu umožňuje velice snadno vytvořit otevřený systém sloužící ke komunikaci vozidel, popřípadě vozidel a infrastruktury způsobem, který byl popsán v této práci.
- dopravní a cestovní informace v reálném čase RTTI (Real-time Traffic and Traveller Information) - na základě simulace dopravy v reálném čase je možné reagovat na krizové situace a hledat jejich optimální řešení, například v podávání informací o optimálních trasách s ohledem na polohu jednotlivých vozidel a aktuální dopravní propustnost silniční sítě.
- interakce mezi člověkem a strojem - vytvořený simulátor slouží jako testovací prostředí pro vývoj prostředků pro zpracování přirozeného jazyka pomocí ja-

zyka TIL (Transparent Intensional Logic) na příkladu komunikace mezi agenty dopravního systému.

Široké možnosti aplikace vytvořeného řešení spočívají v kombinaci MAS, GIS a umělé inteligence. Hlavní přínosy tohoto řešení jsou následující:

- autonomní chování umožňující simulovat chování jednotlivých účastníků silničního provozu.
- otevřenost vytvořeného modelu. Agentový přístup umožňuje snadné začlenění dalších typů agentů nebo rozšíření chování stávajících agentů. Díky modularitě MAS je tak možné postupně rozšiřovat vytvořený model a vytvořit tak velice rozsáhlý a komplexní model dopravy.
- architektura simulátoru umožňující úplnou distribuovatelnost modelu. Jednotlivé agenty lze rozmístit na více počítačů, čímž se rozloží výpočetní náročnost modelu a je tak možné modelovat rozsáhlé oblasti a také využít i výpočetně náročných algoritmů logiky a umělé inteligence. Lze rovněž vytvořit MAS systém složený z agentů umístěných přímo ve vozidlech, což umožní realizovat simulace na základě sběru aktuálních dat přímo z vozidel účastníků se dopravy. Implementace využití platformy JADE nabízí možnost spouštění agentů na různých typech zařízení, od klasických PC přes PDA až po mobilní telefony, což umožní jeho snadné rozšíření.
- integrace funkcí GIS do agentů umožňuje zpracovávat a analyzovat prostorová data. Výsledky dynamického zpracování (simulace) lze publikovat pomocí mapových serverů nebo jejich zpracování do statických mapových výstupů.
- integrace logiky a umělé inteligence umožňuje simulovat chování agentů reagujících i na nepředvídané situace vznikající v dopravní síti. Dalším přínosem je zpracování přirozeného jazyka pomocí jazyka TIL, což do značné míry zjednoduší komunikaci mezi počítačem a lidmi.
- vytvořením inteligentní infrastruktury na základě interakce agentů dopravních prostředků a agentů silniční infrastruktury je možné například vypočítat aktuální vytíženost jednotlivých dopravních úseků a umožnit tak hledání optimální trasy s využitím dynamického ohodnocení grafu silniční sítě.

Vytvořený prostorový MAS popsaný v této práci je pouze základním kamenem pro možný vznik daleko komplexnějších systémů složených z dalších typů agentů. CarAgenty popsané v textu práce tvoří pouze základní vrstvu těchto případných systémů. Nad touto vrstvou je dále možné vytvořit strategickou vrstvu agentů, které využívají CarAgentů jako prostředku k dosažení vlastních cílů. Tyto strategické agenty



mohou například představovat dispečera logistické společnosti nebo dopravního podniku snažícího se o co nejlepší koordinace svěřených CarAgentů a tedy i maximální využití přepravních kapacit. Agenty na strategické vrstvě mohou navzájem kooperovat nebo si naopak konkurovat a optimalizovat tak chování celého dopravního systému. Možnosti aplikace logiky a umělé inteligence jsou při řešení úkolů této strategické vrstvy agentů obrovské. Popsaný prostorový MAS s implementovanou strategickou vrstvou agentů je vhodný pro tvorbu komplexních, robustních a heterogenních systémů jako jsou například:

- inteligentní systém metropolitního parkování - využitím agentového přístupu ve vozidlech a informačních systémech parkovišť lze vytvářet systém pro výběr nejvhodnějšího parkoviště na základě nastavených kritérií. Tento systém by tak automaticky vyhledal a řidiče navedl na nejbližší parkoviště s volnou kapacitou s uživatelem definovanou maximální cenou parkovného.
- optimalizace městské hromadné dopravy - hromadná doprava ve velkoměstech se vyznačuje integrací různých druhů dopravy. Celkový systém je velice komplexní a jeho optimalizace je velice obtížná. Využitím prostorových MAS lze definovat možnosti jejich integrace na úrovni chování jednotlivých typů agentů reprezentujících jednotlivé typy dopravních prostředků. Vzájemná kooperace agentů nad modelem městské infrastruktury zajistí její optimální využití.
- vytvoření komplexních logistických systémů - modulárnost a otevřenost MAS umožňuje snadnou integraci různých existujících systémů, což umožní efektivní komunikaci mezi různými komerčními subjekty a zjednoduší tak plánování přepravy zboží a osob.
- vytvoření inteligentního systému pro řízení dopravy - implementací řídicích prvků městské dopravy pomocí prostorových MAS a jejich propojením se záchrannými složkami by bylo možné například zajistit synchronizaci semaforů s průjezdem vozidla záchranářů, což by jednak zrychlilo jejich dojezdový čas, ale také zvýšilo bezpečnost jejich průjezdu ulicemi města.
- podpora krizového řízení při mimořádných událostech - na základě vymodelované mimořádné události, jako je například stávková v městské dopravě, uzavření částí města z důvodu demonstrace či jiných akcí, které si vynucují omezení propustnosti silniční sítě, je možné dopředu odhalit potenciální kritická místa a navrhnout objízdné trasy nebo jiná opatření.

## 8 Závěr

Tato práce se zabývá způsoby reprezentace prostředí pro ABM. Oblast ABM je v poslední době v popředí zájmu díky novým možnostem spojených s využitím MAS. ABM patří do skupiny tzv. mikrosimulací ve které se již poměrně dlouhou dobu využívá přístup založeného na celulárních automatech. Přístup ABM je však v mnohých ohledech dokonalejší než jednoduché paradigma celulárního automatu. Hlavními přínosy agentového přístupu jsou autonomní chování a možnost zapojení umělé inteligence pro simulování inteligentních individuí.

V úvodním textu práce je popsán vývoj v oblasti mikrosimulací pomocí celulárních automatů, jejich definice a vysvětlení jejich významu pro prostorové modelování. Kromě obecného principu celulárních automatů je uvedena i jejich konkrétní aplikace v oblasti dopravního modelování a simulace. Nejprve jsou popsány tzv. car following modely, které jsou dnes základními modely pro modelování dopravy pomocí celulárních automatů. Následuje vysvětlení jejich principu na příkladu Nagel/Schreckenbergova modelu.

V návaznosti na celulární automaty je popsáno paradigma MAS a s ním potřeba definice prostředí pro jejich možné využití pro prostorové modelování. Dále jsou zde popsány historické souvislosti mezi oběma přístupy v oblasti prostorového modelování a uvedeny používané způsoby reprezentace prostředí v ABM společně s několika příklady již existujících aplikací. Jednotlivé způsoby reprezentace jsou konfrontovány a porovnány jejich výhody a nevýhody. Dále je zde zmíněna úloha GIS jako zdroje prostorových dat a také nástroje pro jejich zpracování. Kromě integrace GIS jako celku je zde popsáno využití jednotlivých datových modelů používaných v GIS jako základu, z něhož se vychází při návrhu prostorových MAS. Z poznatků plyne význam propojení GIS a MAS pro ABM. Dále jsou zde rozebrány způsoby integrace těchto dvou systémů a uvedeny vývojové platformy určené pro ABM. Úvodní část je uzavřena porovnáním a zhodnocením jednotlivých způsobů reprezentace prostředí pro ABM a také zhodnocením stavu vývojových platforem pro ABM. Z průzkumu stavu v této oblasti plyne jasný trend v reprezentaci prostředí, od tradičního popisu pomocí diskrétní sítě buněk vycházejícího z paradigmatu celulárních automatů, ke spojitě reprezentaci prostředí využívající vektorových geoprvků pro reprezentaci agentů, popřípadě objektů prostředí.

Po obecném úvodu se práce zaměřila na reprezentaci prostředí MAS pro oblast modelování a simulaci dopravy. Na základě případové studie, sloužící k ověření logického rozhodování agentů při simulaci individuálního chování v silniční síti, jsou navrženy dva základní způsoby reprezentace prostředí. Na základě analýzy požadavků případové studie, mezi nimiž je požadavek na využití dat skutečné silniční infrastruktury se autor zabývá průzkumem standardů v této oblasti a průzkumem vhodných datových zdrojů. Na základě analýzy standardu GDF specifikujícího způ-



sob popisu silničních dat pro telematické a navigační systémy se autor podílí na návrhu modelu silniční sítě. Nejvýznamnější část práce autora je věnována práci s datovými modely vstupních dat, návrhem a implementací konverzního modulu pro data SDO a implementaci simulačního prostředí. Základním nedostatkem dnešních silničních dat z pohledu ABM je pouze zjednodušená geometrická reprezentace silniční sítě pomocí liniových a bodových geoprvků. Aby bylo možné simulovat individuální chování jednotlivých vozidel, bylo nutné vytvořit model silniční sítě popsané do úrovně jízdních pruhů. K vytvoření takto podrobného modelu silniční infrastruktury byly využita popisná složka dat. Výsledný model tvoří objektově orientovaná hierarchická struktura umožňující jednak plánování pohybu v rámci silniční sítě, dále umístění dopravního značení, ale také simulaci pohybu agentů v rámci jízdních pruhů podobně jako je tomu ve skutečné silniční síti.

Pro vývoj modelu silniční infrastruktury byla vytvořena testovací data na základě studentských měření silniční sítě areálu VŠB-TU Ostrava. Dále je provedena analýza datového modelu dat SDO na jejímž základě a s využitím nástrojů GIS byl implementován modul pro načtení dat do navrženého modelu silniční infrastruktury. Využití původních dat předcházelo jejich předzpracování do vhodné podoby pro vytvoření základních entit navrženého modelu. Při implementaci bylo využito open-source projektů pro práci s datovými formáty vstupních dat a topologických funkcí pro práci s vektorovými geoprvků.

Další významná část práce se soustřeďuje na způsob reprezentace prostředí a jeho implementaci. V průběhu realizace případové studie byl testován hybridní model využívající kombinaci vektorových geoprvků s vnitřní diskrétní reprezentací pravidelné sítě buněk. Tento model umožňuje kromě definice prostředí pro agenty simulující vozidla také simulovat jejich pohyb na základě principu celulárního automatu. Nevýhodou tohoto modelu je nutnost vytváření struktur buněk v rámci silničních úseků a řešení problémů při implementaci metody šíření polí a aplikaci iteračních pravidel přes distribuovanou síť celulárních automatů. Složitost tohoto modelu se v důsledku ukázala být větší než využití kontinuální reprezentace vycházející přímo z vektorových dat. Výsledný model využívá zjednodušeného plošného kontinuálního prostoru, který je snadno implementovatelný, má vyšší prostorovou přesnost než diskrétní model tvořený sítí buněk a není příliš náročný na řešení prostorových vztahů simulovaných entit dopravního systému. Tento pseudo-dvojrozměrný prostor složený z jednorozměrných entit jízdních pruhů umožňuje díky metodě staničení jednoduchou adresaci agentů a objektů, výpočet kolizního prostoru i výpočet rychlosti bez nutnosti práce na úrovni plošných geoprvků, což značným způsobem snižuje výpočetní náročnost modelu.

V neposlední řadě se autor podílel na zapojení navrženého objektově-orientovaného modelu silniční infrastruktury do simulátoru založeného na MAS a implementaci prostorového vnímání agentů. Vnímání je navrženo tak, aby logická jednotka agenta

zodpovědná za jeho chování, získávala informace o svém prostředí podobným způsobem jako je vnímá řidič dopravního prostředku, což umožňuje napodobit rozhodovací procesy skutečného řidiče. Autor práce se dále podílel na rozšíření původní architektury simulátoru vycházející z dizertační práce Pavla Děrgela o 3D vizualizaci simulace v aplikaci ESRI ArcScene.

Přínos této práce je především v navrženém a prakticky ověřeném modelu silniční sítě vycházející z analýzy standardu GDF. Výsledný model umožňuje nad daty silniční infrastruktury simulovat individuální chování inteligentních agentů. Dále pak také způsob vnímání prostředí agenty. Díky navrženému modelu a způsobu prostorového vnímání agentů je implementovaný simulátor vhodný pro testování a vývoj logického rozhodování agentů, určeného pro modelování celé řady scénářů, jak je uvedeno v kapitole věnující se aplikaci vytvořeného simulátoru v kontextu individuální dopravy.

Výsledky této práce jsou využity pro řešení grantu Logika a umělá inteligence pro multi-agentové systémy. Tento výzkum je podporován programem “Informační společnost” akademie věd České republiky, projekt číslo 1ET101940420.

## Reference

- [1] AXTELL, R.; EPSTEIN, J.; DEAN, J.; aj.: Population Growth and Collapse in a Multiagent Model of the Kayenta Anasazi. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Long House Valley, 2002, ISSN 1091-6490.
- [2] BANDINI, S.; DEPAOLI, F.; MANZONI, S.: Mechanisms to Support Situated Agent Systems. Proceedings of the Seventh International Symposium on Computers and Communications (ISCC 02), 2002.
- [3] BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D.: *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. John Wiley & Sons, L td, 2007, ISBN 0-470-05747-5, 286 s.
- [4] BENENSON, I.; BIRFUR, S.; V., K.: *Geographic Automata Systems and the OBEUS Software for Their Implementation*. Springer Berlin Heidelberg, 2006, ISBN 978-3-540-25917-6, 137-153 s.
- [5] BENENSON, I.; TORRENS, M., P.: Geographic Automata Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005: s. 385–412.
- [6] BENENSON, I.; TORRENS, P.: Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena. 2004.
- [7] BERGENTI, F.; GLEIZES, M. P.; ZAMBONELLI, F.: *Methodologies and software engineering for agent systems*. Kluwer Academic Publishers, 2004, ISBN 1-4020-8057-3.
- [8] CASTLE, C. J. E.; CROOKS, A. T.: Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations. *Centre for Advanced Spatial Analysis University College London. UCL Working papers series*, 2008, ISSN 1467-1298.
- [9] CROOKS, A. T.: The Repast Simulation/Modelling System for Geospatial Simulation. *Centre for Advanced Spatial Analysis University College London. UCL Working papers series*, 2006, ISSN 1467-1298.
- [10] CROOKS, A. T.: Constructing and Implementing an Agent-Based Model of Residential Segregation through Vector. *Centre for Advanced Spatial Analysis University College London. UCL Working papers series 133*, 2008, ISSN 1467-1298.
- [11] DIETZEL, C.; CLARKE, K.: The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. 2005.

- [12] DĚRGEL, P.: *Prostorové multi-agentové systémy*. Dizertační práce, VŠB-TU Ostrava, Institut geoinformatiky, 2006.
- [13] DĚRGEL, P.; FUKS: Simulation environment for situated Multi-agent systems. In *GICON 2005*, 2005.
- [14] DĚRGEL, P.; FUKS: Intelligent traffic simulation based on Multi-Agent system. In *BNAIC 06 - BeNeLux conference on Artificial Intelligence*, 2006, ISBN 3-540-35588-X.
- [15] DĚRGEL, P.; FUKS, P.: Simulace silniční infrastruktury s využitím distribuovaných celulárních automatů v multi-agentovém systému. *Acta Montanistica Slovaca* 27, 2007: s. 48–52, ISSN 1335-1788.
- [16] DĚRGEL, P.; FUKS, P.: Traffic simulation environment for Multi-Agent systems based on GIS. In *9th International Conference on Geocomputation 2007*, 2007.
- [17] DĚRGEL, P.; FUKS, P.: Modelling and visualization of the traffic system with Multi-agent system and GIS. In *Proceedings of MSV'08 - The 2008 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods*, 2008.
- [18] DĚRGEL, P.; FUKS, P.; HRUBÁ, L.: GIS traffic micro-simulation with Multi-agent system. In *Asia GIS 2008 Conference*, 2008.
- [19] EIDELSON, B.; LUSTICK, I. V.-P.: An Agent-Based Analysis of Smallpox Preparedness and Response Policy. 2004.
- [20] FERBER, J.: *Multi-Agent Systems An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Harlow: Addison-Wesley Logman, 1999, ISBN 0-201-36048-9, 509 s.
- [21] FUKS, P.: Object-oriented Road Infrastructure for Agent-based Traffic Simulation. In *Proceedings of Symposium GIS Ostrava 2008*, Institut geoinformatiky, 2008.
- [22] HAMALAINEN, A.: *Studies of Traffic Situations Using Cellular Automata*. Dissertations of Laboratory of Physics, Helsinki University of Technology, 2006, ISBN 951-22-8369-7, 202 s.
- [23] HUMMELSHEIM, K.: GDF extension format for transport telematics applications. Technická zpráva, NextMAP consortium, 2002.
- [24] Český normalizační institut: Inteligentní dopravní systémy - Geografické datové soubory (GDF) - Celková datová specifikace. 2004.

- [25] JAKUBÍK, D.: Modelování a simulace komunikační sběrnice. 2007.
- [26] JANTZ, C. A.; GOETZ, S. J.: Analysis of scale dependencies in an urban land-use-change model. 2005.
- [27] Koch, A.: Linking Multi Agent Systems And GIS - Modeling And Simulating Spatial InterActions.
- [28] KŘIVÝ, O.; KINDLER, E.: Simulace a modelování. 2001.
- [29] LAU, K. H.; KAM, B. H.: A cellular automata model for urban land-use simulation. 2005.
- [30] LAY, J.: A Land Use Change Study using Cellular Automata. In *Proceedings of GISdevelopment*, 2000.
- [31] Li, X.; YEH, A. G.: Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. 2005.
- [32] LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; aj.: Geographical Information Systems and Science. 2005.
- [33] MORENO, M.; MARCEAU, D.: A vector-based cellular automata model to allow changes of polygon shape. In *The Society for Modeling and Simulation International*, 2006.
- [34] MORENO, M.; MARCEAU, D.: Modelling land-use changes using a novel vector-based geographic cellular automata. In *18th IASTED International Conference: modelling and simulation*, 2007.
- [35] NORTH, M.; MACAL, C.; VOS, J.: Terrorist Organization Modelling. In *Proceedings of North American Association for Computational Social and Organizational Science Conference*, 2004.
- [36] RAPANT, P.: *Geoinformatika a geoinformační technologie*. Institut Geoinformatiky, VŠB-TU Ostrava, 2006, ISBN 80-248-1264-9, 462 s.
- [37] RAPANT, P.: Prostor v multiagentových systémech modelujících prostorové procesy. 2007.  
URL <<http://actamont.tuke.sk/pdf/2007/n2/2rapant.pdf>>
- [38] SCHRECKENBERG, M.; SELTEN, R.: Human Behaviour and Traffic Networks. 2004.
- [39] TEFATSION, L.: Agent-based Computational Economics.  
URL <<http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>>

- [40] WOLFRAM, S.: Cellular Automata and Complexity: Collected Papers. 1994.
- [41] WOLFRAM, S.: A New Kind of Science. 2002.  
URL <<http://www.wolframscience.com/reference/notes/876b>>
- [42] WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N.: Intelligent Agents: Theory and Practice. 1995.
- [43] Dictionary and Thesaurus - Merriam-Webster Online.  
URL <<http://www.merriam-webster.com/>>
- [44] DND Modelling & Simulation Synthetic Environments LEXICON.  
URL <[http://www.google.cz/url?sa=X&start=27&oi=define&ei=JsKFSM2ACIiq1ga3venLCA&sig2=u8FBAFTkmWi\\_J0sRF1wWyA&q=http://www.drdc-rddc.gc.ca/seco/documents/MS\\_Lexicon\\_Apr02.doc&usg=AFQjCNHjffj1H7QgDJCVMSx1WXkj-DkLLIg](http://www.google.cz/url?sa=X&start=27&oi=define&ei=JsKFSM2ACIiq1ga3venLCA&sig2=u8FBAFTkmWi_J0sRF1wWyA&q=http://www.drdc-rddc.gc.ca/seco/documents/MS_Lexicon_Apr02.doc&usg=AFQjCNHjffj1H7QgDJCVMSx1WXkj-DkLLIg)>
- [45] FIPA - The Foundation for Intelligent Physical Agents.  
URL <<http://fipa.org>>
- [46] IEEE 100 The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms.  
URL <[ieeexplore.ieee.org/iel5/4116785/4116786/04116789.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4116785/4116786/04116789.pdf)>
- [47] ISO International Standards for Business, Government and Society.  
URL <<http://www.iso.org>>
- [48] MAGS Project: Multi-Agent GeoSimulation and Crowd Simulation.  
URL <<http://www2.ift.ulaval.ca/%7EMUSCAMAGS/>>
- [49] Open Geospatial Consortium, OpenGIS Simple Features Specification For SQL Revision 1.1.  
URL <<http://www.opengeospatial.org/standards>>
- [50] Research Laboratory of Intelligent Systems.  
URL <<http://labis.vsb.cz/labis/index.php>>
- [51] Research Laboratory of Intelligent Systems - Dokumentace, ontologie.  
URL <[http://labis.vsb.cz/wiki//index.php/CAS:Documentation/Ontologie\\_Logika](http://labis.vsb.cz/wiki//index.php/CAS:Documentation/Ontologie_Logika)>
- [52] The World of Math Online.  
URL <<http://www.math.com/students/wonders/life/life.html>>
- [53] Konference Doprava a eSafety. 2005.  
URL <<http://www.cdv.cz/text/seminare/esafety2005.htm>>

- [54] Přehled údajů sledovaných v datové základně informačního systému o silniční a dálniční síti. 2005.
- [55] European Commission - Information Society, eSafety. 2008.  
URL <[http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/esafety/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/index_en.htm)>

## **Příloha A - Datový slovník testovacích dat porubského areálu VŠB-TU Ostrava**



Název třídy	Slovní popis	Typ geo-prvku	2D/3D	SS	Zdroj dat
vsb_junction	Třída definující místo křížení (křižovatka) nebo napojení (změna jízdních pruhů) entit RoadElement v závislosti na atributu <i>jtype</i> .	bod	2D	S-JTSK	Ortorektifikovaný letecký snímek areálu VŠB-TUO rok pořízení 1998.
vsb_road	Třída obsahuje osy všech komunikací pro motorová vozidla. Za komunikaci nejsou považovány polní cesty s ne- zpevněným hliněným povrchem. Třída odpovídá entitě RoadElement. Entita RoadElement definuje část cest mezi křižovatkami se stejným počtem jízdních pruhů. Posloupnost geoprvků této třídy mezi dvěma křižovatkami odpovídá entitě Road.	linie	2D	S-JTSK	Ortorektifikovaný letecký snímek areálu VŠB-TUO rok pořízení 1998.
traffic_signs	Třída obsahuje vybrané druhy vertikálního dopravního značení pro případovou studii dopravní simulace. Mezi sledované druhy dopravního značení patří: Hlavní pozemní komunikace; Dej přednost v jízdě; Stůj, dej přednost v jízdě!; Nejvyšší dovolená rychlost	bod	2D	S-JTSK	

Tabulka 10: Seznam tříd geoprvků

Třída geo-prvků 1	Třída geo-prvků 2	Slovní popis vztahů mezi třídami
vsb_junction	vsb_road	Třída odpovídající entitě Junction definuje počáteční a koncový bod každé třídy odpovídající entitě RoadElement.
vsb_road	-	Komunikace nesmí mít volné konce. Výjimku tvoří slepé ulice.
vsb_road	-	Komunikace končí nebo začíná vždy v místě určené třídou Junction. Linie komunikace nesmí sama sebe protínat ani se nesmí překrývat, výjimku tvoří mimoúrovňová křižení.

Tabulka 11: Vztahy mezi třídami geoprvků

Název atributu	Slovní popis atributu	Doména	Datový typ	Integritní omezení	Pov.	Klíč	Číselník
FID	Automaticky generovaný identifikátor úseků komunikace.	Výčtová	Text (5)	99999	ANO	ANO	-
jid	identifikátor geoprvcu ve tvaru [j9999]	Výčtová	Text (5)	j9999	ANO	NE	-
jtype	typ určující druh entity	Výčtová	Text (1)	A	ANO	NE	JUNCTION_TYPE
road_1	identifikátor navazujícího silničního úseku	Výčtová	Text (6)	re9999	ANO	NE	-
road_2	identifikátor navazujícího silničního úseku	Výčtová	Text (6)	re9999	ANO	NE	-
road_3	identifikátor navazujícího silničního úseku	Výčtová	Text (6)	re9999	ANO	NE	-
road_4	identifikátor navazujícího silničního úseku	Výčtová	Text (6)	re9999	ANO	NE	-

Tabulka 12: Třída geoprvců - Body křížení

JUNCTION_TYPE	Hodnota
Kód	
j	změna jízdních pruhů
c	křížovatka

Tabulka 13: Číselník atributů *jtype* pro třídu geoprvců vsb\_junction

Název atributu	Slovní popis atributu	Doména	Datový typ	Integritní omezení	Pov.	Klíč	Číselník
FID	Automaticky generovaný identifikátor úseků komunikace.	Výčtová	Text (5)	99999	ANO	ANO	-
reid	Identifikátor geoprůvku ve tvaru [re9999]	Výčtová	Text (6)	re9999	ANO	NE	-
startat	Identifikátor počátečního prvku Junction	Výčtová	Text (5)	j9999	ANO	NE	-
endat	Identifikátor koncového prvku Junction	Výčtová	Text (5)	j9999	ANO	NE	-
roadid	Název definující příslušnost k entity Road	Výčtová	Text (5)	r9999	ANO	NE	-
length	Délka úseku v metrech	Proměnná	Číslo (12/4)	-	ANO	NE	-
lanes_pos	Počet pruhů vpravo	Proměnná	Číslo (2)	99	ANO	NE	-
lanes_neg	Počet pruhů vlevo	Proměnná	Číslo (2)	99	ANO	NE	-

Tabulka 14: Třída geoprůvků - Osy komunikací

Název atributu	Slovní popis atributu	Doména	Datový typ	Integritní omezení	Pov.	Klíč	Číselník
FID	Automaticky generovaný identifikátor úseků komunikace.	Výčtová	Text (5)	99999	ANO	ANO	-
re_ID	Identifikátor geoprvcu třídy vsb_road ke které dopravní značení přísluší	Výčtová	Text (6)	re9999	ANO	NE	-
position	Vzdálenost od počátku geoprvcu třídy vsb_road	Proměnná	Číslo (12/4)	-	ANO	NE	-
side	Strana vozovky pro níž dopravní značení platí	Výčtová	Text (1)	A	ANO	NE	-
sign_type	Typ dopravního značení	Výčtová	Text (20)	-	ANO	NE	SIGN_TYPE
sign_value	Informačního hodnota dopravního značení	Proměnná	Text (10)	-	NE	NE	-

Tabulka 15: Třída geoprvců - Dopravní značení

SIGN_TYPE	
Kód	Hodnota
01	Hlavní pozemní komunikace
02	Dej přednost v jízdě
03	Stůj, dej přednost v jízdě!
04	Nejvyšší dovolená rychlost

Tabulka 16: Číselník atributů *sign\_type* pro třídu geoprvců traffic\_signs